

ERRATA

Onde se lê: área de concentração Estruturas e Geotécnica
Leia-se: área de concentração Estruturas

Campinas, 26 de agosto de 2011



Eudir Alves Affonso



Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**EXTENSOMETRIA ÓPTICA POR *MOIRÉ* GEOMÉTRICO
DIGITAL PARA ANÁLISE DE TENSÕES NO PLANO**

EUDIR ALVES AFFONSO

Engº Civil

CAMPINAS, 2011



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

EUDIR ALVES AFFONSO
Engº Civil

**EXTENSOMETRIA ÓPTICA POR *MOIRÉ* GEOMÉTRICO
DIGITAL PARA ANÁLISE DE TENSÕES NO PLANO**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas e Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo (FEC – UNICAMP)

Co-orientador: Prof. Dr. Inácio M. Dal Fabbro (FEAGRI – UNICAMP)

CAMPINAS, 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Af28e	<p>Affonso, Eudir Alves</p> <p>Extensometria óptica por Moiré geométrico digital para análise de tensões no plano / Eudir Alves Affonso. - Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientadores: Mauro Augusto Demarzo, Inácio Maria Dal Fabbro.</p> <p>Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Metodo de Moiré. 2. Mecânica dos sólidos. 3. Deformação e tensões. 4. Medição. I. Demarzo, Mauro Augusto. II. Dal Fabbro, Inácio Maria. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Optical extensometry by digital geometric Moiré for in-plane stress analysis

Palavras-chave em Inglês: Method of Moiré, Solid mechanics, Strain and stresses, Measurement

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Eduardo Acedo Barbosa, Antonio Carlos Loureiro Lino, Giovanni Francisco Rabelo, Julio Soriano

Data da defesa: 20/06/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

EUDIR ALVES AFFONSO

Engº Civil

**EXTENSOMETRIA ÓPTICA POR *MOIRÉ* GEOMÉTRICO DIGITAL
PARA ANÁLISE DE TENSÕES NO PLANO**

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

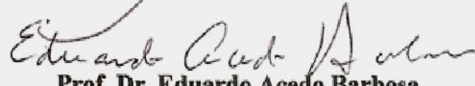

Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo

Presidente e Orientador

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP


Dr. Antonio Carlos Loureiro Lino

Centro de Engenharia e Automação do Instituto Agronômico de Campinas


Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa

Faculdade de Tecnologia de São Paulo do CEETPS


Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo

Universidade Federal de Lavras


Prof. Dr. Julio Soriano

Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP

Campinas, 20 de junho de 2011

Dedicatória

À minha amada esposa Marisa e filhos
Claudia, Luis Henrique e Laura; e aos meus
pais Eulino e Dirce.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e, em particular:

A Deus, por ter me dado as condições e a oportunidade para poder realizar este trabalho.

Ao Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo e Prof Dr. Inácio Maria Dal Fabbro, pela orientação cuidadosa, dedicada, pela amizade e apoio no transcorrer da elaboração desta tese.

Aos professores, funcionários e colegas da Fundação Educacional de Barretos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (FEC –UNICAMP), pelos ensinamentos transmitidos e pela gratificante convivência, e em especial, ao Prof. Dr. Luis Carlos de Almeida da FEC- UNICAMP pelo apoio.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Menezes da FEC- UNICAMP, Dr. Antonio Carlos Loureiro Lino do Instituto Agrônomo de Campinas- CEA-IAC, Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa da FATEC-SP do CEETPS, Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo da Universidade Federal de Lavras por terem aceitado o convite para formar a banca desta tese.

Ao Prof. Dr. Julio Soriano da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, Prof. Dr. Carlito Calil Junior da EESC-USP e Prof Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr da EESC-USP e por aceitar participar da banca como suplentes.

À reitoria, direção, professores, funcionários e alunos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo IFSP pelo incentivo e concessão de afastamento para capacitação, e em particular à Profª Me. Arqtª. Devanir Cabral Lima Morikawa pelo apoio e amizade.

À Profª. Drª. Lucila Helena D. Cescato e Prof. Dr. Jaime Frejlich Sochaczewsky, ambos do IFGW-UNICAMP, Prof. Dr. Fernando Marinho da EPUSP e ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, por terem aberto as portas de seus respectivos laboratórios para meus ensaios.

Aos Professores James McKelvie da University of Strathclyde, Glasgow, Scotland (UK) e Daniel Post da Virginia Tech (USA), que gentilmente responderam aos meus emails e em muito me auxiliaram.

Aos colegas da FEC-UNICAMP, em especial ao Dr. Marcelo Tacitano e Engº Alcibíades Chavez Arauz; aos colegas da FEAGRI-UNICAMP, e em especial ao Dr. Silvestre Rodrigues, Dr. Adilson Machado Eanes, Engº Jonathan Gazzola e ao Frederico Augusto Bergamini de Lima, e aos colegas do IFGW Dr. Luis Ávila e Dr. Luis E. Gutierrez-Rivera, pela cooperação e auxílio no laboratório de óptica, junto ao tema da pesquisa, além da amizade demonstradas.

Em especial aos funcionários da FEC-UNICAMP, Margarita L. A. Bello Barrera do DES e Luciano Passos do laboratório de estruturas e aos funcionários do laboratório e oficina mecânica da FEAGRI-UNICAMP, pela presteza e atenção dispensadas.

Ao Sr. Luiz Oliveira, Sr. Mario Sergio Alves de Mello e todas as pessoas das empresas da área de circuitos eletrônicos que me auxiliaram na fotolitografia dos retículos.

Um agradecimento especial ao Sr. Agilson Gavioli da Clipgraph (SP) e à Multek (SP), pela colaboração e doação de retículos gravados em plástico *mylar*, à empresa Arinos Química (SP), pela doação de solventes, às empresas MLC (SP), Multicircuitos (SP), Cirtron (SP), Weber (SP) e Griffus (SP), que cederam gratuitamente as instalações industriais, material e mão de obra para testes de gravação com fotolitografia.

À arquiteta Claudia Teixeira Alves Affonso pelo incansável auxílio e dedicação na digitação e revisão de textos, Figuras e fotografias.

À minha querida esposa Marisa e filhos Claudia, Luis Henrique e Laura pela paciência, compreensão, auxílio, carinho e amor que me dedicaram durante todo o tempo.

E aos meus pais Eulino e Dirce pelo incentivo, colaboração, dedicação e amor.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	23
1.1 - Objetivos e Justificativa	25
1.2 - Apresentação	26
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 - A História dos Testes Experimentais em Estruturas	27
2.2 - A Definição de Deformação Específica e a sua Determinação Experimental	29
2.2.1 - Definições de Deslocamento e Deformação Específica.....	29
2.2.2- A Determinação Experimental da Deformação Específica.....	37
2.2.2.1 - A Qualidade dos Erros Experimentais	43
2.2.2.2 - As Propriedades dos Sistemas de Extensometria.....	45
2.2.2.3 - Os Tipos de Extensômetros.....	48
2.3 - A Extensometria Óptica de Campo Inteiro	48
2.3.1 - Princípios Básicos da Extensometria Óptica.....	48
2.3.1.1 - Retículos (ou Redes de Difração).....	51
2.3.1.2 – Fontes de Luz Utilizadas na Extensometria Óptica.....	52
2.3.2 - O Estado da Arte da Fotomecânica	52
2.3.3 - A Classificação dos Métodos Ópticos de Campo Inteiro.....	56
2.3.4 - Parâmetros para a Escolha de Métodos Ópticos de Campo Inteiro	58
2.4 - As Técnicas de <i>Moiré</i>	60
2.4.1 - O Fenômeno <i>Moiré</i>	60

2.4.2 - As Técnicas de Moiré por Interferência Mecânica (ou Geométrica) para Determinação do Deslocamento no Plano.....	65
2.4.3 - Aplicações da Técnica de <i>Moiré</i> Geométrico (TMG) para Medições no Plano	70
2.4.4 - A Sensibilidade das Técnicas de <i>Moiré</i>	71
2.4.5 - A Exatidão das Técnicas de <i>Moiré</i>	72
2.4.6 - Teoria da Formação Básica de Franjas para o Deslocamento no Plano.....	73
2.4.6.1 - Análise Geométrica	77
2.4.6.1.1 - Análise Geométrica para Grandes Deformações e Rotações	77
2.4.6.1.2 - Análise Geométrica para Pequenas Deformações e Rotações	83
2.4.6.1.3 - Análise Geométrica Simplificada para Pequenas Deformações e Rotações	85
2.4.6.2 - Análise para Pequenas Deformações e Rotações a Partir de Campo de Deslocamentos Numéricos	86
2.4.6.3 - Análise para Pequenas Deformações e Rotações a Partir do Campo de Deslocamentos em Imagens Digitais.....	88
2.4.7 - O Aumento de Sensibilidade das Técnicas de <i>Moiré</i>	89
2.4.7.1 – O Método da Multiplicação Óptico-Digital de Franjas (ODFM).....	89
2.4.7.2 - O Método do Deslocamento de Fase (ou Quase-Heterodino).....	96
2.4.7.3 - Vantagens e Desvantagens dos Métodos de Aumento de Sensibilidade das Técnicas de <i>Moiré</i>	100
2.4.8 - Procedimentos e Aspectos Experimentais para a Técnica de <i>Moiré</i> Geométrico (TMG).....	102
2.4.8.1 - Os Diversos Arranjos Experimentais para Medição de Deslocamentos no Plano pela Técnica de <i>Moiré</i> Geométrico (TMG).....	102
2.4.8.1.1 - O Método da Sobreposição Direta	103
2.4.8.1.2 - O Método da Dupla-Exposição	105
2.4.8.1.2.1 - O Método da Dupla-Exposição em Duas Chapas de Filme	108
2.4.8.1.3 - O Método da Sobreposição Óptica	108
2.4.8.1.4 - Método de Superposição dos Retículos por Projeção	109
2.4.8.2 - Os Retículos	109
2.4.8.2.1 - Principais Técnicas de Aplicação de Retículos no Modelo	112
2.4.8.2.1.a - Retículos Desenhados.....	112

2.4.8.2.1.b - Formação dos Retículos com Máquinas e Ferramentas	112
2.4.8.2.1.c - Impressão Fotográfica Direta	112
2.4.8.2.1.d - Filme Fotográfico	113
2.4.8.2.1.e - Transferência de Retículos Metálicos	113
2.4.8.2.1.f - Método Estêncil	113
2.4.8.2.1.g - Retículos de Fase.....	114
2.4.8.2.1.h - Colagem de Telas Metálicas	114
2.4.8.2.1.i - Padrão Impresso em Papel	115
2.4.8.2.1.j - Transferência de Retículos Impressos.....	115
2.4.8.2.2 - Os Retículos Mestres.....	116
2.4.8.3 - Origens dos Ruídos e Imagens-Fantasma	117
2.4.8.4 - Rotações e Deslocamentos de Corpo Rígido	117
2.4.8.5 – Franjas de Movimento	118
2.4.8.6 – As Lentes e os Objetos de Superfície Difusa e Especular	119
2.4.8.6.1 – Objetos de Superfície Difusa.....	120
2.4.8.6.2 – Objetos de Superfície Especular.....	123
2.4.9 - Processamento de Dados para a Técnica de <i>Moiré</i> Geométrico (TMG).....	125
2.4.9.1 - Generalidades	125
2.4.9.2 - Subtração de Campo de Deslocamento de Referência.....	125
2.4.9.3 - Filtragem	126
2.4.9.4 - Máscaramento	126
2.4.9.5 - Operações Aritméticas e Lógicas	127
2.4.9.6 - O Programa <i>IMAGE J - Image Processing and Analysis in Java</i>	127
2.4.9.7 - O programa <i>Moiré Analysis Software (MAS)</i>	128
3 – MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS.....	131
3.1 - Considerações Gerais	131
3.1.1 - Recursos Utilizados.....	132
3.1.2 - Diretrizes da Pesquisa	134
3.2 - Os Retículos	134
3.2.1 - A Obtenção dos Retículos	134

3.2.1.1 – Retículos Formados por Impressão em Jato de Tinta.....	134
3.2.1.2 – Retículos Formados por Fotolitografia.....	136
3.2.2 - A Aplicação dos Retículos no Modelo.....	138
3.2.2.1 - Colagem de Vinil Impresso.....	138
3.2.2.2 - Transferência de Retículo Impresso.....	138
3.2.2.3 – Gravação por Fotolitografia	139
3.2.2.3.1 - Gravação por Fotolitografia no CEA - IAC.....	140
3.2.2.3.2 – 1ª Gravação por Fotolitografia no IFGW-Unicamp	141
3.2.2.3.3 – Gravação por Fotolitografia na empresa MLC.....	143
3.2.2.3.4 – 2ª Gravação por Fotolitografia no IFGW-Unicamp	144
3.2.2.3.4 – Gravação por Fotolitografia Diretamente sobre O Aço.....	145
3.2.2.3.5 – Gravação por Fotolitografia sobre o Aço em Duas Camadas	145
3.2.2.3.6 – Gravação no Fotorresiste em Filme Seco e Transferência para o Modelo	146
3.2.2.4 - Colagem Direta do Fotolito no Modelo	148
3.3 - A Digitalização dos Retículos.....	149
3.3.1 - Digitalização dos Retículos com <i>Scanner</i>	149
3.3.2 - Digitalização dos Retículos com Câmera Fotográfica Digital	149
3.3.2.1 - Os Arquivos Tipo RAW.....	151
3.4 - A Geração e Multiplicação das Franjas	151
3.4.1 - O Efeito da Distorção da Lente na Geração das Franjas.....	154
3.4.2 - O Efeito da Orientação das Linhas dos Retículos na Geração Digital das Franjas Obtidas Após a Multiplicação	155
3.4.3 - TMGD com Rotação Relativa dos Retículos	156
3.4.4 - Multiplicação de Franjas por 8, 16, 32, 64 e 128 Vezes pela Rotina MULTIFRAN.....	157
3.4.5 - A Filtragem Avançada do Programa <i>Moiré Analysis Software</i> (MAS).....	157
3.5 - Descrição Geral da Extração, Tratamento e Análise dos Resultados	159
3.5.1 - Determinação da Escala da Imagem	159
3.6 - O Arranjo Experimental.....	160
3.6.1 – Iluminação	160
3.6.2 - Nivelamento Horizontal da Câmera.....	162

3.6.3 - Posicionamento da câmera em relação ao eixo z do modelo	162
3.6.4 - Posicionamento da Câmera em Relação ao Eixo x e y do Modelo	163
3.6.5 - Posicionamento do Modelo na Máquina de Ensaios.....	163
3.6.6 - A Estabilidade da Câmera	163
3.6.7 - A Estabilidade do Modelo.....	164
3.7- A Calibração da TMGD com <i>Strain-gages</i>	164
3.8 - Ensaios Virtuais com a Técnica de <i>Moiré</i> Geométrico Digital (TMGD)	165
3.8.1 – Objetivos.....	165
3.8.2 – Equipamentos Utilizados.....	165
3.8.3 – Arranjos Utilizados.....	165
3.8.4 – Outros Dados dos Ensaios	166
3.8.5- Ensaio EV01 - Aplicação da TMGD (Arranjo 1)	167
3.8.5.1 - Preparação das Imagens	167
3.8.5.2- Cálculos Analíticos para Duas Franjas Exatas.....	168
3.8.5.3 - Geração da Imagem Deformada I_0 scaled	168
3.8.5.4- Rotina da Aplicação da TMGD no Ensaio EV01	169
3.8.5.5- Resultados da Aplicação da TMGD no Ensaio EV01	172
3.8.5.6 – Aplicação do Método DFM para Multiplicação das Franjas do Ensaio EV01 por Dois.....	173
3.8.5.6.1 – Resultados da Multiplicação das Franjas do Ensaio EV01 por Dois	174
3.8.6 – Ensaio EV02 - Aplicação da TMGD (Arranjo 1).....	175
3.8.6.1 – Aplicação do Método DFM para Multiplicação de Franjas do Ensaio EV02 por Quatro	176
3.8.6.1.1 – Resultados da Multiplicação das Franjas do Ensaio EV02 por Quatro	177
3.8.7 – Ensaio EV03 - Aplicação da TMGD (Arranjo 2).....	177
3.8.7.1 – Aplicação do Método DFM para Multiplicação de Franjas do Ensaio EV03 por Quatro	178
3.8.7.1.1 – Resultados da Multiplicação das Franjas do Ensaio EV03 por Quatro	180
3.8.8 - Ensaio EV04 - Aplicação e Resultados da TMGD e da rotina MULTIFRAN para multiplicação de Franjas por 2, 4, 8, 16 e 32 (Arranjo 2).....	181

3.9 - Ensaios Experimentais Completos	182
3.9.1 - Ensaios no Laboratório LEMC FEC - UNICAMP	185
3.9.2 - Ensaios no Laboratório LMS Laboratório de Mecânica de Solos da EPUSP.....	188
3.9.3 - Ensaios no LACAM –Laboratório de Caracterização de Materiais do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo CTMSP	189
3.9.1 - Ensaios no Laboratório LABMEB FEAGRI – UNICAMP	189
3.9.2 - Ensaios no Laboratório LABMEM FEC – UNICAMP	190
3.9.2.1 - Ensaios com os modelos de aço doce CP04.....	190
3.9.2.2 - Ensaios com o modelo de madeira CPM	190
4 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	193
5 - CONCLUSÕES.....	197
6 - NOVOS RUMOS PARA A PESQUISA	199
7 - REFERÊNCIAS	201
APÊNDICE - LISTAGENS DA ROTINA MULTIFRAN PARA A MULTIPLICAÇÃO DIGITAL DE FRANJAS (DFM) (<i>desenvolvida pelo autor, utilizando o Software IMAGE J</i>). 213	
ANEXO A - FILME FOTOSSENSÍVEL SECO PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSOS	223

Resumo

AFFONSO, Eudir Alves. **Extensometria Óptica por *Moiré* Geométrico Digital para Análise de Tensões no Plano**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2011, 225 p., Tese (Doutorado).

A análise do comportamento das estruturas das obras de engenharia civil passam pela determinação das deformações e tensões atuantes em seus elementos. Neste contexto, a extensometria desempenha um papel fundamental. Nos laboratórios de estruturas civis do Brasil, os extensômetros utilizados, em geral, têm se limitado a determinar a deformação específica em um dado ponto dos corpos-de-prova. Verifica-se, porém, que a extensometria óptica apresenta-se como alternativa vantajosa para esta tarefa, fornecendo resultados para todos os pontos da área de medição (em campo inteiro ou *full field*). Entre as técnicas da extensometria óptica, a de *moiré* foi escolhida por ser a mais simples e apresentar os menores índices relativos de ruídos. O objetivo geral desta tese foi a implantação desta técnica. Os resultados mostraram que a sensibilidade da técnica de *moiré* por interferência mecânica (ou geométrica) alcançou níveis que anteriormente só podiam ser obtidos com o uso de interferômetros (*moiré* interferométrico). Esta tarefa foi possível por multiplicação de franjas obtida por processo digital (DFM), e mostrou-se capaz de medir deformações micrométricas a partir de retículos de baixa frequência. Este trabalho é apresentado como técnica de *moiré* geométrico digital (TMGD), pois tudo, desde a captura da imagem do retículo do modelo até a geração de franjas foi feita por meio digital, e não se insere na classificação geral das técnicas de *moiré* presente na bibliografia. O resultado obtido foi algo ainda inovador: uma técnica de baixo custo, insensível a perturbações do meio-ambiente, e capaz de fazer medições na superfície plana dos diversos materiais estruturais, sem aparatos dispendiosos. As conclusões mostram a aplicabilidade do método proposto para medir deformações e analisar tensões em modelos e estruturas de engenharia civil.

Palavras-Chave: Método de *Moiré*, Mecânica dos Sólidos, Deformação e Tensão, Medição.

Abstract

The study of the behavior of building structures pass through the determination of the strain and stresses to evaluate the level of local and global security against the active actions. In the last years in Brazil, the extensometers have been commonly used to measure the strain at a specific single point. The optical extensometry presents itself as an alternative to this task by providing results for all points of measurement area (full field).The moiré techniques are the simplest of the optical extensometry and have the smaller indeces relating to noise. In this work, the sensitivity of mechanics (or geometric) interference of moiré technique reached levels that previously could only be obtained using interferometers (moiré interferometry). It is worth noting that interferometers are appliances that cost thousands of dollars. This task was made possible through the multiplication of fringes obtained through digital technology with application present in photography and digital image processing and proved able to measure deformations for micrometric from very low frequency cross gratings. This work is presented as digital geometric moiré technique (TMGD) because everything from image capture of specimen gratings until the generation of fringes was made by digital means and therefore does not fall within the classification set out in chapter which deals with the classification of moiré techniques. The result was something still unheard in civil engineering in Brazil, a low-cost technique, insensitive to vibrations and of the environment, moreover able to make measurements in plane surfaces without major apparatus. Findings show the applicability of the proposed method to measure strain and to analyze stresses in models and civil engineering structures.

Keywords: Method of Moiré, Solid mechanics, Strain and stresses, Measurement

1 - INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento das estruturas requer o conhecimento das tensões, deformações e deslocamentos em seus elementos para avaliação do nível de segurança local e global frente às ações atuantes.

O desempenho das estruturas só poderá ser mais bem avaliado se houver o conhecimento preciso dos valores que representam a resposta da estrutura às ações atuantes. Para qualquer projeto também é necessário conhecer características das propriedades elásticas e às vezes também das propriedades plásticas dos materiais que serão utilizados. Os testes de laboratório podem ser concebidos para fornecer informações desta natureza.

Neste contexto, a medição de deformações, ou extensometria, ocupa um papel importante. Para esta finalidade, são utilizados extensômetros de diversos tipos. Pode-se citar entre os mais usuais os extensômetros mecânicos, ópticos, elétricos e acústicos.

Nos laboratórios de engenharia estrutural civil, no Brasil, é muito comum medirem-se as deformações dos corpos-de-prova de maneira pontual e unidirecional com os conhecidos extensômetros elétricos (*strain-gages*), colados na superfície do modelo, ou com associações destes.

Quando o objeto a se conhecer é um campo de deformações complexo, por exemplo ligações parafusadas, a sua medição pode ser dificultada e até mesmo inviabilizada, pelo fato de serem necessários muitos extensômetros para cobrir todo o campo de interesse.

A extensometria óptica possui técnicas capazes de realizar esta tarefa, fornecendo resultados para todos os pontos da área de medição, conhecidas como técnicas de medição em campo inteiro (*full-field*).

Segundo Yatagai (2007), a medição por meios ópticos constitui um dos meios de medição conhecidos que possui a maior exatidão, e por isto, recentemente, o comprimento de onda da luz foi adotado na definição da unidade de comprimento.

Os extensômetros elétricos (*strain-gages*) ainda possuem uma maior resolução do que a usualmente alcançada atualmente pelos métodos ópticos (especialmente pelas técnicas de luz branca), estes últimos tendo a vantagem adicional de pertencer à família das técnicas de não-contato (FÉLIX, 2004).

Além de possibilitar a medição de campos complexos de deslocamentos e deformações, estas técnicas podem ser utilizadas para identificação dos parâmetros que regem as equações constitutivas dos materiais, e isto tem sido considerado uma questão chave na mecânica experimental de estruturas (ALMEIDA, 2006), (AVRIL, BONNET, *et al.*, 2008), (GRÉDIAC, PIERRON, *et al.*, 2006).

Estas possibilidades tem tornado o estudo de técnicas ópticas de campo inteiro ainda mais atraente.

Para este trabalho foi escolhida a técnica de *moiré geométrico* (TMG) por se destacar das demais pela sua abrangência, simplicidade e baixo custo.

O advento do método quase-heterodino (ou deslocamento de fase) e posteriormente, do método de multiplicação óptico-digital de franjas (ODFM), possibilitou o aumento significativo de sensibilidade das técnicas de *moiré* através da multiplicação de franjas em até vinte vezes.

Este fato possibilita que a técnica de *moiré* geométrico com sensibilidade melhorada (TMGSM) possa ser aplicada com um leque maior de opções e venha a se tornar um instrumento de aplicação corrente nos laboratórios do Brasil.

1.1 - Objetivos e Justificativa

O texto precedente caracteriza bem a relevância acadêmica e científica para estudar a medição de deslocamentos e deformações em campo inteiro para análise estrutural.

Outras técnicas, já disponíveis há algum tempo, requerem importação de aparelhos tais como câmeras especiais, *softwares*, interferômetros ou aparelhos de *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI).

Têm sido publicados estudos avançados de medições de deslocamentos em nano-escala pelas técnicas de *moiré* interferométrico (TMI), na superfície e interior de corpos transparentes. Estes estudos avançados requerem equipamentos e técnicas sofisticadas de aquisição de imagem de alta resolução tais como *Atomic Force or Scanning Tunneling Microscopy* (AFM/STM) e *Near Field Scanning Optical Microscopy* (NFSOM), e trabalham em pequenas escalas (XIE, KISHIMOTO, *et al.*, 2007).

Recentemente têm sido anunciados *scanners* 3D disponibilizados no Brasil a um custo não modesto, com sensibilidade de até 80 μm .

A limitação de recursos financeiros disponíveis para os laboratórios de estruturas civis nas universidades brasileiras tem desencorajado a aquisição destes equipamentos dispendiosos e sofisticados.

O objetivo geral deste trabalho é utilizar a técnica de *moiré* geométrico de sensibilidade melhorada (TMGSM), para a medição dos deslocamentos e deformações nas superfícies planas dos corpos-de-prova, ou estruturas, de forma econômica. Estas medições deverão ter sensibilidade micrométrica e fornecer dados densos o suficiente, para de posse dos parâmetros constitutivos dos materiais, possam ser analisadas as tensões atuantes no campo inteiro.

Para que o objetivo geral, acima descrito, seja alcançado, é necessário atender aos objetivos específicos, a saber:

- a) Obter retículos capazes de fazer medições com a sensibilidade, resolução, exatidão e precisão requeridas para a utilização corrente em materiais estruturais, nos laboratórios de estruturas.
- b) Estudar e desenvolver técnicas de gravação e aplicação dos retículos acima referidos nos modelos.
- c) Estudar e especificar equipamentos para aquisição de imagens digitais dos retículos.

- d) Estudar e desenvolver aparatos experimentais para otimizar a obtenção dos dados.
- e) Estudar e desenvolver técnicas de extração, tratamento e análise de dados.

Embora se tenha notícia de algumas tentativas isoladas, no Brasil, de utilização da extensometria por TMG no plano, desconhece-se a exploração sistematizada deste recurso em laboratórios de engenharia civil estrutural em escala micrométrica.

Trata-se, portanto de um trabalho pioneiro no Brasil.

1.2 - Apresentação

Este trabalho, quase integralmente, foi desenvolvido utilizando tecnologia digital, com fundamentos da técnica de *moiré* geométrico (TMG), desde a captura da imagem do retículo do modelo até a geração de franjas, e por isto não se insere na classificação exposta no capítulo que trata da classificação das técnicas de *moiré*. Esta é a razão do trabalho ser apresentado como técnica de *moiré* geométrico digital (TMGD).

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - A História dos Testes Experimentais em Estruturas

Segundo Reese e Wendell (1993), é provável que o primeiro teste estrutural tenha acontecido quando uma estrutura importante foi à ruptura. O requisito da permanência dos construtores sob as obras recém construídas era comum na antiguidade. Aqueles que sobreviviam eram acolhidos com grande prestígio perante a comunidade e as suas estruturas eram consideradas seguras por seus usuários.

Havia muitos tipos de rupturas, quando estas eram construídas por procedimentos de tentativa e erro ou utilizando-se de práticas pouco aceitas. Muito foi aprendido com os problemas encontrados nos processos de construção, habilitando estes primeiros engenheiros estruturais a se tornarem mestres em construção utilizando os procedimentos de tentativa e erro como uma forma rudimentar de fazer testes.

Da Vinci conduziu testes de tração em fios de ferro utilizando o arranjo mostrado na Figura 2.1 (a). Galileo também aplicou testes em corpos-de-prova de tração e flexão. O arranjo de Galileo está mostrado na Figura 2.1 (b).

As medições experimentais feitas para testar estruturas surgiram na Inglaterra por volta de 1670 com Robert Hooke (1635-1703). Seus experimentos determinaram as relações força-deslocamento para fios com carga axial em tração.

Estes resultados experimentais conduziram à solução de muitos problemas em engenharia estrutural (como por exemplo, as relações das tensões normais em uma viga em flexão). Estas relações básicas são usadas até hoje para descrever o comportamento elástico das estruturas (TIMOSHENKO, 1953).

As publicações de experimentos realizados por Alphonse Duleau e Pierre C. Dupin por volta de 1815 demarcaram o começo da moderna era da mecânica experimental. Essas experiências influenciaram a engenharia mecânica e engenheiros estruturais no século 20. Duleau e Dupin interessaram-se pela análise e dimensionamento de estruturas nas quais o comportamento dos materiais em níveis baixos de tensão eram importantes. Naquela época não existiam dados descrevendo o comportamento de metais e de madeira para pequenas deformações e por isto, empreenderam um programa para obter dados experimentais (BELL, 1989).

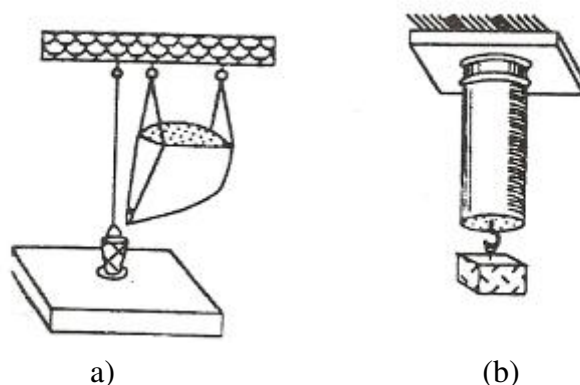


Figura 2.1-Ensaio de tração feitos por (a) Leonardo da Vinci e (b) Galileio.
Fonte (TIMOSHENKO, 1953).

Duleau foi contratado para projetar uma ponte de ferro fundido sobre o rio Dordogne, na França. Foram testados vários corpos-de-prova em tamanho natural, com vários tipos de seções transversais para determinar seu comportamento em tração, compressão, flexão, torção e estabilidade elástica. Duleau encontrou uma solução satisfatória na hipótese linear para pequenas deformações e tensões.

Foi atribuída a Dupin a responsabilidade de determinar as mudanças nas formas de navios de madeira após o seu lançamento. Ele realizou testes em vigas de madeira e determinou a forma real das vigas deformadas. A partir dessas experiências desenvolveu-se um procedimento analítico que incluiu testes com peso morto para determinar tensões e deformações em sólidos.

Foi atribuída a Duleau e Dupin a introdução da elasticidade linear quase-estática. Por muitos anos, as pessoas envolvidas na mecânica analítica tinham expectativas voltadas para o estudo do comportamento não-linear dos sólidos em toda a faixa de intensidades de deformações. A introdução e a aceitação do comportamento linear elástico dos materiais pela comunidade científica foi uma contribuição importante para a engenharia estrutural.

BELL (1989) resume a contribuição de Duleau e Dupin da seguinte maneira:

A continuação de seu trabalho no século 19 é essencialmente desprovida de controvérsia. “Naquilo que pode ser chamado de “era do projeto por desastres”, a relativa simplicidade da teoria linear de elasticidade e sua disponibilização com uma aproximação razoável na maioria dos casos apresentou uma base para a saúde da engenharia aplicada”.

O trabalho de Duleau e Dupin lançou as bases para os ensaios estruturais. A adoção da Lei de Hooke é fundamental para a mecânica dos sólidos de hoje.

A análise dos sistemas estruturais e os resultados dos testes nas estruturas devem complementar-se.

Os testes estruturais têm uma história mais recente do que a engenharia estrutural. O seu desenvolvimento com métodos e técnicas de mecânica experimental tem sua origem por volta de 1800 e realmente acelerou durante a segunda guerra mundial em termos de equipamentos e instrumentos de medição (REESE e WENDELL, 1993).

2.2 - A Definição de Deformação Específica e a sua Determinação Experimental

Neste item será discutida a deformação dos corpos, a deformação específica e a ela associada, e também a sua determinação experimental (DALLY e SHUKLA, 2010).

Não serão necessárias informações a respeito do material, considerando que a deformação específica é uma quantidade geométrica pura.

2.2.1 - Definições de Deslocamento e Deformação Específica

Quando um corpo é submetido a um sistema de forças, os pontos deste corpo apresentarão movimentos decorrentes desta ação. O movimento de um ponto qualquer é um vetor quantitativo

conhecido como deslocamento. Se cada ponto do corpo realizar diferentes movimentos, cada um será representado por seu próprio e único vetor deslocamento. Cada vetor pode ser decomposto em componentes paralelas a um grupo de coordenadas cartesianas u , v e w que são componentes dos deslocamentos nas direções de x , y e z , ou 1, 2 e 3, conforme o sistema de coordenadas adotado.

O movimento do corpo pode ser considerado como a soma de duas partes:

1. Translação e/ou rotação de um corpo como um todo;
2. O movimento dos pontos de um corpo relativo a qualquer outro.

A translação ou rotação de um corpo como um todo é conhecida como movimento de corpo rígido. Este tipo de movimento é aplicável tanto a um corpo rígido teórico quanto a um corpo deformável real.

O movimento relativo de pontos com relação a outros pontos de um mesmo corpo é conhecido como deformação e é obviamente uma propriedade exclusiva dos corpos deformáveis reais.

Os movimentos de corpo rígidos podem ser grandes ou pequenos.

Com exceção de materiais muito elásticos ou em estruturas especiais, as deformações geralmente são pequenas.

As deformações são quantidades geométricas que dependem do movimento relativo de dois ou três pontos no corpo, e por isso estão relacionadas apenas àqueles deslocamentos referentes à deformação do corpo.

Os deslocamentos de corpo rígido não produzem deformações, e por isto não entram nestes cálculos.

Para as deformações é usada uma classificação semelhante à utilizada para as tensões, e existem dois tipos: a deformação normal e a deformação de cisalhamento (ou tangencial).

A deformação normal é definida como a mudança de comprimento de um segmento de linha entre dois pontos divididos pelo comprimento original do segmento de linha.

A deformação de cisalhamento é definida como a mudança angular entre dois segmentos de linhas originalmente perpendiculares entre si.

A relação entre deformação e deslocamento é determinada considerando-se a deformação de um cubo elementar arbitrário em um corpo, como resposta a um sistema de cargas aplicado.

Esta deformação está ilustrada na Figura 2.2, no qual um ponto genérico P é deslocado de uma distância:

- u na direção x ,
- v na direção y ,
- w na direção z .

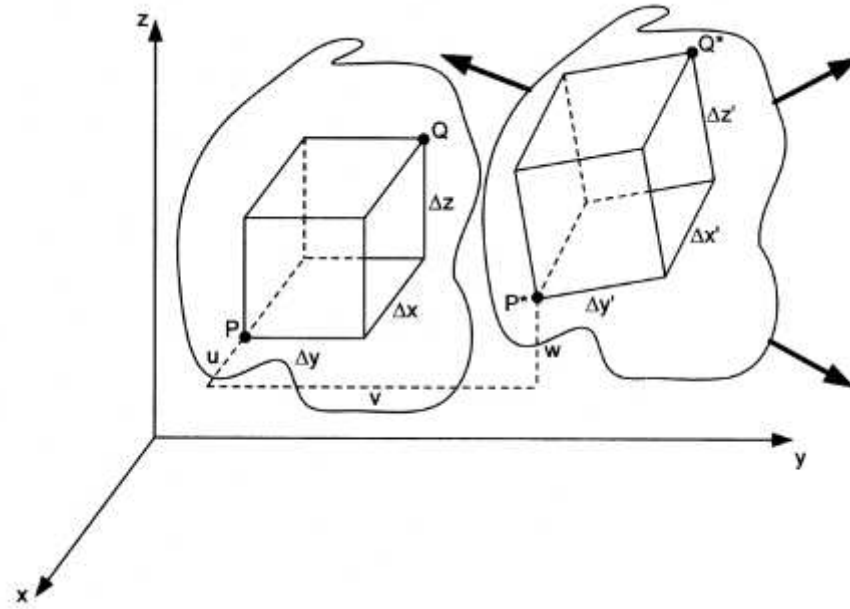


Figura 2.2 – A distorção de um cubo elementar arbitrário em um corpo devido à aplicação de um sistema de forças.

Fonte: (DALLY e SHUKLA, 2010).

Os deslocamentos u^* , v^* e w^* associados ao ponto Q podem ser expressos em termos de deslocamento u , v e w do ponto P por meio da expansão por séries de Taylor. Portanto:

$$\begin{aligned}
 u^* &= u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z + \dots \\
 v^* &= v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial v}{\partial z} \Delta z + \dots \\
 w^* &= w + \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial w}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial w}{\partial z} \Delta z + \dots
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Os termos mostrados nas expressões acima serão os únicos significativos se o cubo for considerado suficientemente pequeno para que os termos de ordem superior tais como $(\Delta x)^2, (\Delta y)^2, (\Delta z)^2 \dots$ possam ser desprezados.

Nestas condições, planos deverão permanecer planos e linhas retas deverão permanecer linhas retas no cubo deformado, como mostra a Figura 2.2.

A deformação normal média ao longo de um segmento de linha arbitrário foi previamente definida como sendo a variação de comprimento do segmento de linha dividido pelo seu comprimento original. A deformação normal pode então ser expressa em termos do deslocamento dos pontos no final do segmento.

Por exemplo, considere-se que a linha PQ seja originalmente orientada paralelamente ao eixo x, como mostrado na Figura 2.3.

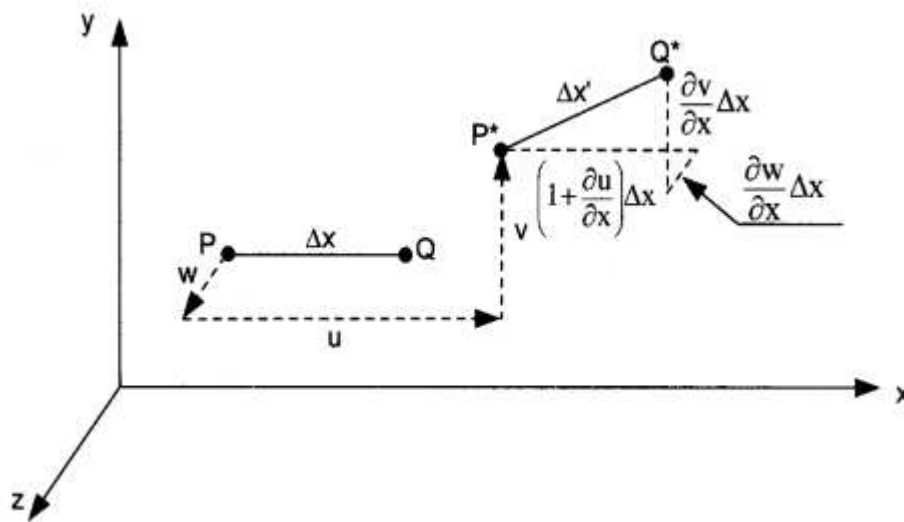


Figura 2.3 – Deslocamento de gradientes associados com a tensão normal ϵ_{xx} .

Fonte: (DALLY e SHUKLA, 2010).

Uma vez que y e z são constantes ao longo de PQ , as equações (2.1) resultarão nos seguintes deslocamentos para o ponto Q , se o deslocamento para o ponto P for u , v e w :

$$u^* = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \quad v^* = v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \quad w^* = w + \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x$$

De acordo com a definição de força normal:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta x} \quad (a)$$

Então é equivalente a:

$$\Delta x' = (1 + \varepsilon_{xx}) \Delta x \quad (b)$$

Como mostra a Figura 2.3, a linha de deformação $\Delta x'$ consegue ser expressa em termos de gradientes de deslocamento como:

$$(\Delta x')^2 = \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Delta x \right]^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \Delta x \right)^2 \quad (c)$$

Substituindo a eq. (b) na eq. (c):

$$(1 + \varepsilon_{xx})^2 (\Delta x)^2 = \left[1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] (\Delta x)^2$$

ou

$$\varepsilon_{xx} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2} - 1 \quad (2.2a)$$

De maneira análoga, ao considerar segmentos de linha originalmente orientados paralelos ao eixo y e z:

$$\varepsilon_{yy} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} - 1 \quad (2.2b)$$

$$\varepsilon_{zz} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial w}{\partial z} + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} - 1 \quad (2.2c)$$

As componentes tangenciais da deformação também podem ser relacionadas aos deslocamentos considerando-se as variações no ângulo reto nas bordas do cubo durante a deformação, também chamada de distorção.

Por exemplo, considerem-se as linhas PQ e PR, mostradas na Figura 2.4. O ângulo θ entre P*Q* e P*R* no estado deformado pode ser expresso em termos de gradientes de deslocamentos. Isto é possível uma vez que o cosseno do ângulo formado pela intersecção de duas linhas quaisquer no espaço é a soma dos produtos dos cossenos diretores dos ângulos formados pelas linhas com respeito ao mesmo conjunto de eixos de referência.

Portanto:

$$\cos \theta^* = \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\Delta x}{\Delta x'} \right] \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta y'} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta x'} \right) \left[\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\Delta y}{\Delta y'} \right] + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta x'} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta y'} \right) \quad (d)$$

A partir da definição de deformação de cisalhamento, ou distorção:

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\pi}{2} - \theta^* \right) \quad (e)$$

Consequentemente:

$$\sin \gamma_{xy} = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta^* \right) = \cos \theta^* \quad (f)$$

Substituindo a eq. (d) na eq. (f) e simplificando temos:

$$\sin \gamma_{xy} = \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial y} + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] \frac{\Delta x}{\Delta x'} \frac{\Delta y}{\Delta y'} \quad (g)$$

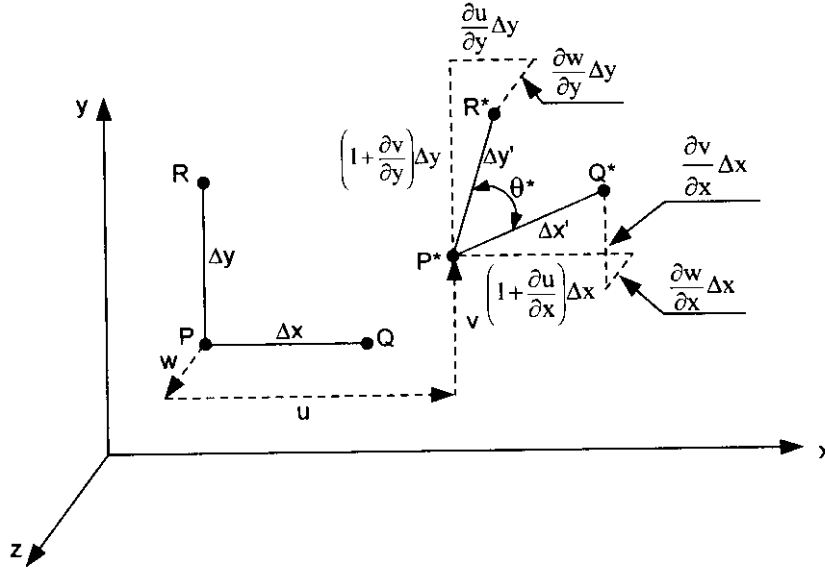


Figura 2.4 - Gradientes de deslocamento associados com a deformação de cisalhamento γ_{xy} .
Fonte: (DALLY e SHUKLA, 2010).

A partir da equação (b):

$$\Delta x' = (1 + \varepsilon_{xx}) \Delta x \quad \text{e} \quad \Delta y' = (1 + \varepsilon_{yy}) \Delta y \quad (h) \text{ e } (i)$$

Portanto:

$$\gamma_{xy} = \arcsin \frac{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}}{(1 + \varepsilon_{xx})(1 + \varepsilon_{yy})} \quad (2.3a)$$

De maneira similar, considerando dois segmentos de linhas originalmente orientados paralelamente aos eixos y e z e também os eixos z e x:

$$\gamma_{yz} = \arcsin \frac{\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z}}{(1 + \varepsilon_{yy})(1 + \varepsilon_{zz})} \quad (2.3b)$$

$$\gamma_{zx} = \arcsin \frac{\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x}}{(1 + \varepsilon_{zz})(1 + \varepsilon_{xx})} \quad (2.3c)$$

As equações (2.2) e (2.3) representam a deformação em termos da posição dos pontos no corpo antes e depois da deformação.

No desenvolvimento dessas equações, nenhuma limitação foi imposta para as magnitudes das deformações.

Na verdade, uma restrição foi introduzida quando foram desprezados os termos de ordem superior na expressão dos deslocamentos pela série de Taylor. Esta restrição tem o efeito de limitar o comprimento dos segmentos das linhas de base utilizada para cálculo da deformação, salvo no caso em que os gradientes dos deslocamentos na região de interesse sejam essencialmente constantes. Serão necessários pequenos comprimentos das linhas de base para medir com precisão as deformações nos casos em que as variações dos gradientes dos deslocamentos forem grandes na região de interesse.

Em uma vasta gama de problemas de engenharia os deslocamentos e deformações produzidos pelos carregamentos são muito pequenos. Nestas condições, pode ser admitido que os produtos e os quadrados dos gradientes de deslocamentos serão pequenos com respeito aos gradientes de deslocamento e por isto podem ser desprezados. Com estas hipóteses as equações (2.2) e (2.3) reduzem-se para a forma usualmente encontrada na teoria da elasticidade. O estado de deformação fica caracterizado pelas suas seis componentes cartesianas da deformação.

As equações (2.4) indicam que é simples obter-se o campo da deformação a partir do campo do deslocamento. Contudo, raramente todo campo do deslocamento é determinado experimentalmente. Geralmente as deformações são determinadas nos números de pequenas áreas na superfície do corpo através do uso de extensômetros.

Neste trabalho, as técnicas de *moiré* fornecem os campos de deslocamento no plano e, neste contexto, as equações (2.4) são muito importantes.

A forma reduzida destas equações é:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
 \mathcal{E}_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
 \mathcal{E}_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
 \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\
 \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\
 \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Para o caso do plano, as expressões que contém a componente z são descartadas.

2.2.2- A Determinação Experimental da Deformação Específica

Segundo Dally e Shukla (2010), na maioria das aplicações, as medições de pequenas deformações são realizadas na superfície livre do corpo em estudo. O estado bi-dimensional de tensões existente nesta superfície livre pode ser expresso em função das três deformações cartesianas:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
 \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

As componentes ε são deformações normais por exemplo, ε_{xx} é definida como sendo a mudança no comprimento linear paralelo ao eixo x, dividido pelo seu comprimento inicial.

A componente γ_{xy} é a deformação de cisalhamento definida como sendo a mudança no ângulo reto formado pela intersecção das linhas paralelas aos eixos x e y (ver Figura 2.5).

Se os dois deslocamentos u e v correspondentes podem atuar sobre a superfície do corpo, as deformações podem ser determinadas diretamente pelas equações 2.5.

Em alguns casos, a maneira mais adequada de calcular os estados de tensão e de deformação é determinar inicialmente o campo de deslocamentos.

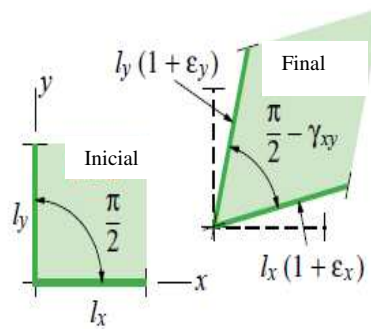


Figura 2.5 – Deformações normais e de cisalhamento.
Fonte: (PHILLIPS, 2001).

Como exemplo, considere-se o caso de uma viga transversalmente carregada. Os deslocamentos verticais $w(x)$ ao longo do eixo longitudinal podem ser determinados com precisão com técnicas experimentais relativamente simples.

As tensões e deformações podem ser escritas em termos de deslocamentos verticais $w(x)$ por:

$$\epsilon_{xx} = \frac{z}{\rho} = z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad \text{e} \quad \sigma_{xx} = E z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (2.6)$$

onde ρ é o raio de curvatura da viga e z é a distância da linha neutra até o ponto considerado.

Os deslocamentos transversais em placas também podem ser determinados com relativa facilidade, e as tensões e deformações calculadas com equações similares à 2.6.

No caso mais geral, o campo de deslocamentos não pode ser determinado tão facilmente. Além disto, a transformação de deslocamentos em deformações requer a determinação (por diferenciação) dos gradientes dos deslocamentos determinados experimentalmente em muitos pontos da superfície em questão. Pressupondo que os deslocamentos são usualmente difíceis de

obter, e o processo de diferenciação está sujeito a grandes erros, é aconselhável utilizar um extensômetro para cada direção, separadamente, para medir a deformação diretamente.

O exame das equações 2.5 revela que as deformações ϵ_{xx} , ϵ_{yy} e γ_{xy} representam as declividades das superfícies de deslocamento u e v . Além disto, estas deformações não são geralmente uniformes, isto é elas variam ponto a ponto. As declividades das superfícies de deslocamentos não podem ser determinadas a menos que os deslocamentos u e v , no plano, possam ser medidos com precisão. Uma vez que estes deslocamentos são muito pequenos em comparação com os deslocamentos fora do plano (w), mencionados previamente, a sua medição diretamente em toda a superfície do corpo é muito difícil. Para contornar esta dificuldade, uma componente do deslocamento é usualmente medida sobre uma pequena região do corpo, ao longo de um curto segmento de linha, tal como mostrado na Figura 2.6. Esta medição de deslocamento é transformada em deformação pelas equações:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\ell_x - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (2.7)$$

onde, $\Delta u = \ell_x - \ell_0$ é o deslocamento na direção x do segmento de linha $\ell_0 = \Delta x$.

A deformação medida desta maneira não é exata, pois a mesma foi determinada a partir de um comprimento finito ℓ_0 , e não pontualmente, como a sua definição determina.

O erro existente nesta aproximação depende do gradiente de deformação e do comprimento do segmento de linha ℓ_0 . Se a deformação que ocorre no centro do segmento de linha, que é o ponto x_1 da Figura 2.6, for considerada como o valor da deformação do segmento, o erro calculado para vários gradientes de deformação são:

- Caso 1, deformação constante: $\epsilon_{xx} = k_1$ (nenhum erro é introduzido);
- Caso 2, deformação linear: $\epsilon_{xx} = k_1x + k_2$ (nenhum erro é introduzido);
- Caso 3, deformação quadrática: $\epsilon_{xx} = k_1x^2 + k_2x + k_3$ (existe erro).

No caso 3, um erro foi cometido porque a deformação no ponto médio x_1 não é igual à deformação média no comprimento base ℓ_0 .

A deformação média $\varepsilon_{\text{média}}$ no comprimento ℓ_0 pode ser calculada por:

$$\varepsilon_{\text{média}} = \frac{\int_0^{\ell_0} (k_1 x^2 + k_2 x + k_3) dx}{\ell_0} = \frac{k_1}{3} \ell_0^2 + \frac{k_2}{2} \ell_0 + k_3 \quad (a)$$

e a deformação no ponto médio $x_1 = \frac{\ell_0}{2}$ é dada por:

$$\varepsilon_{xx(x_1)} = \frac{k_1}{4} \ell_0^2 + \frac{k_2}{2} \ell_0 + k_3 \quad (b)$$

A diferença entre a deformação média e a deformação no ponto médio representa o erro δ que é dado por:

$$\delta = \frac{k_1}{12} \ell_0^2 \quad (2.8)$$

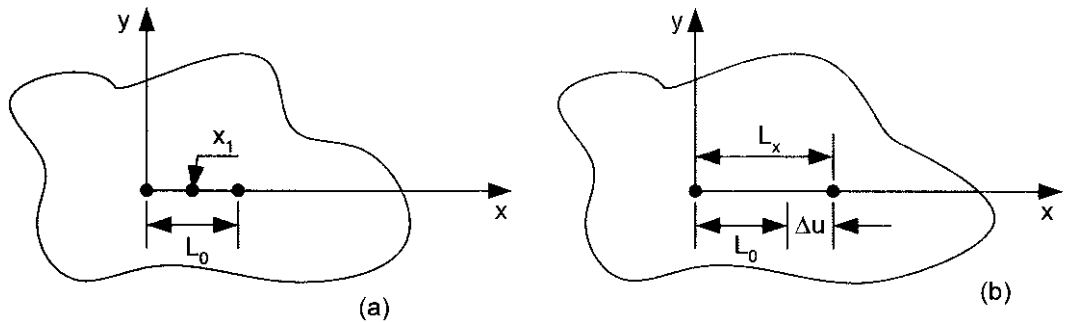


Figura 2.6 – Medições de deformações sobre um segmento de linha de comprimento ℓ_0 :

(a) antes da deformação; (b) depois da deformação.

Fonte: (DALLY e SHUKLA, 2010).

Neste exemplo, o erro cometido depende dos valores de k_1 e ℓ_0 . Se o gradiente da deformação é alto, o valor de k_1 será significativo e o erro induzido será grande, a não ser que o comprimento de base ℓ_0 seja reduzido ao mínimo. Outros exemplos de distribuição de deformação tais como de terceira e quarta ordens podem também ser analisados. Entretanto, o fato é que um erro será sempre induzido por qualquer tipo de distribuição diferente da linear.

Em vista do erro introduzido pelo comprimento do segmento de linha em certos campos de deformação, houve grande mobilização no sentido de reduzir o comprimento ℓ_0 da base de cálculo de medição. Dois fatores têm complicado estes esforços, segundo Dally e Shukla (2010):

1. As dificuldades de ordem mecânica para reduzir ℓ_0 .

Atente-se para o fato de que ℓ_0 é um comprimento finito, e é composto por certo número de peças. Na proporção em que ele é reduzido as peças tornam-se menores e as tolerâncias dimensionais requeridas em cada peça tornam a redução de ℓ_0 inexequível.

2. A deformação a ser medida é uma quantidade muito pequena.

Supondo que haja uma tolerância de $\pm 1 \mu$ nas determinações de deformação feitas sobre um comprimento-base de 2,5 mm, o extensômetro deve ser sensível o suficiente para medir o correspondente deslocamento de 2,5 nanômetros. Estes minúsculos tamanhos e requerimentos de alta precisão são uma tarefa pesada para os pesquisadores e desenvolvedores de extensômetros.

Os menores extensômetros comercializados usualmente até hoje (2011) são os baseados em resistência elétrica. Eles são fabricados em uma folha ultrafina de uma liga onde um retículo é impresso por meio fotográfico com apenas 0,2 mm de comprimento de base ℓ_0 .

Os extensômetros mecânicos ainda são empregados em peças que apresentam pequenas variações nas deformações ao longo de seu comprimento base, que chega a ter $\ell_0 = 20$ cm (extensômetros do tipo Berry). Estes aparelhos são robustos, simples de usar, e precisos o suficiente em algumas aplicações estruturais onde a linearidade de distribuição da deformação existe em todo comprimento-base (20 cm). Um exemplo deste tipo de aparelho é mostrado na Figura 2.7.

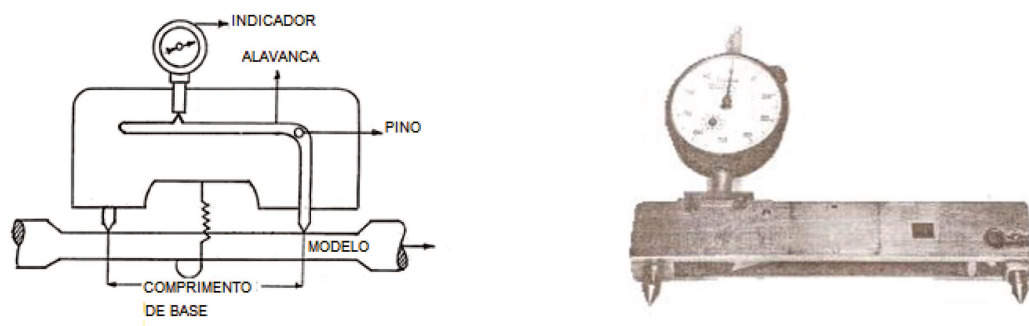


Figura 2.7 – Extensômetro tipo Berry.

Fonte: (TAKEIA, 2001).

Considerando os comprimentos inicial (ℓ_i) e final (ℓ_f), respectivamente, eles podem ser interpretados em termos de deformação específica de várias maneiras diferentes:

- deformação específica de Lagrange (utilizada neste trabalho):

$$\varepsilon = \frac{\ell_f - \ell_i}{\ell_i}$$

- deformação específica de Euler:

$$\varepsilon = \frac{\ell_f - \ell_i}{\ell_f}$$

- deformação específica natural:

$$\varepsilon = \ln \frac{\ell_f}{\ell_i}$$

2.2.2.1 - A Qualidade dos Erros Experimentais

Vários autores propõem parâmetros que nos permitem verificar a qualidade ou a consistência das medidas obtidas pelas técnicas experimentais, explicadas com o exemplo do tiro ao alvo.

Resolução:

Menores mudanças que o sensor pode captar e quantificar. Ver Figura 2.8.

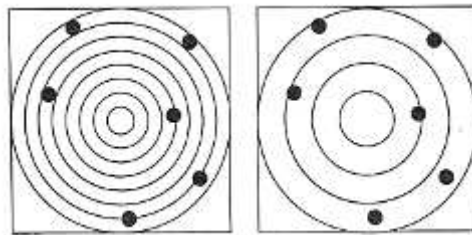


Figura 2.8 – Resolução dos instrumentos de medida.
Fonte: (ANDRADE, 1998).

Precisão:

É o grau de dispersão dos valores em torno da média. Ver Figura 2.9.

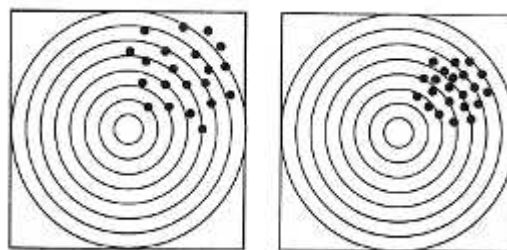


Figura 2.9 – Precisão dos instrumentos de medida.
Fonte: (ANDRADE, 1998).

Exatidão:

Variações estatísticas entre medições repetidas de um valor conhecido. Ver Figura 2.10.

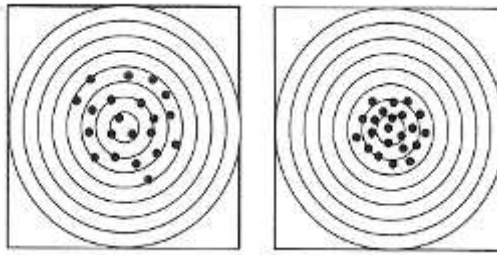


Figura 2.10 – Exatidão dos instrumentos de medida.
Fonte: (ANDRADE, 1998).

Outras propriedades também foram citadas:

Repetibilidade:

As medidas podem ser repetidas.

Sensibilidade ambiental:

Fatores ambientais que podem influenciar as medições.

Velocidade:

Velocidade em que as medidas dos perfis são obtidas pelas técnicas.

Quando se realizam medições, há sempre erros induzidos. As fontes de erro são diversas e podem ser classificadas em:

Erros Sistemáticos

São aqueles que fazem com que as medidas feitas estejam consistentemente acima ou abaixo do valor real. As fontes deste tipo de erro são facilmente identificáveis em princípio, podem ser eliminados ou compensados.

Erros deste tipo prejudicam a exatidão da medida.

Alguns exemplos de causas de erros sistemáticos são:

- utilização de instrumentos descalibrados;

- métodos de observação inadequados;
- efeitos ambientais;
- simplificação de modelos teóricos.

Erros aleatórios

São variações normais das medidas, para cima ou para baixo da média. Este tipo de erro afeta a precisão da medida e nem sempre é possível identificar as suas causas.

Exemplos de fontes típicas de erros aleatórios são devidos a:

- julgamento feito pelo observador ao fazer uma leitura abaixo da menor divisão de uma escala;
- flutuações ambientais não previsíveis.

A Figura 2.11 mostra as Diferenças entre precisão e exatidão das medidas devido a erros sistemáticos e aleatórios.

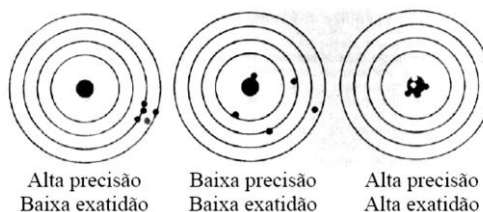


Figura 2.11 - Diferenças entre precisão e exatidão das medidas devido a erros sistemáticos e aleatórios.

Fonte: (WILLMOT, ACKLESON, *et al.*, 1985) apud (LINO, 2002).

2.2.2.2 - As Propriedades dos Sistemas de Extensometria

Vários princípios físicos nortearam a fabricação dos extensômetros. Foram desenvolvidos os extensômetros mecânicos, ópticos, elétricos, acústicos e pneumáticos. Nenhum deles pode ser caracterizado como absolutamente perfeito.

Segundo Dally e Shukla (2010), algumas características gerais usadas normalmente para julgar a adequação de um sistema de extensometria são:

1. A constante de calibração para o comprimento base deve ser estável. Ela não deve variar com fatores tais como o tempo, a temperatura, e outros fenômenos ambientais.
2. Deve ser capaz de medir com uma exatidão de $\pm 1 \mu$ sobre uma faixa de deformação de $\pm 10\%$.
3. O comprimento de base ℓ_0 e a largura w_0 precisam ser pequenas para permitir que a medição da deformação em um ponto seja aproximada por um pequeno erro.
4. A resposta bastante influenciada por sua inércia deve ser suficiente para permitir a gravação de deformações dinâmicas com componentes de frequência que excedam 100 kHz.
5. O sistema deve permitir leitura remota ou no local do ensaio.
6. A extração de dados deve ser feita de forma independente de fatores como a temperatura e outras influências ambientais.
7. O extensômetro e o seu equipamento auxiliar devem ter custo baixo para serem utilizados com frequência.
8. O sistema de extensometria deve ser fácil de instalar e de operar.
9. Deve haver uma resposta linear à deformação sobre um grande intervalo.
10. Deve adequar-se ao uso como elemento sensor em outros sistemas de transdução, quando uma quantidade desconhecida como, por exemplo, a pressão é medida em termos de deformação.

Nenhum sistema de extensometria satisfaz a todas estas características. No entanto, o sistema de extensometria pode ser selecionado para uma determinada aplicação, após a devida análise de cada uma dessas características, tendo em mente o atendimento aos requisitos da medida a ser feita. Vários sistemas foram concebidos, desenvolvidos e comercializados a partir da segunda metade do século vinte, com muitas variações em projeto.

Cada um destes sistemas tem quatro características básicas que merecem uma especial atenção:

- o comprimento-base¹ ℓ_0 ;
- a sensibilidade de medição;
- o intervalo de deformação;
- a exatidão da leitura.

Os erros introduzidos poderão depender definitivamente do comprimento-base ℓ_0 , conforme mostra a equação 2.8, e podem também depender da largura do extensômetro w_0 .

O comprimento base nos extensômetros mecânicos é caracterizado pela distância entre duas hastes pontiagudas salientes em contato com o corpo-de-prova (ℓ_0) e pela largura da parte móvel (w_0). Nos extensômetros por resistência elétrica da lâmina metálica, (ℓ_0) e (w_0) são determinados pelo tamanho da área ativa do retículo. Uma das características mais importantes para a escolha do extensômetro é o comprimento da base de medição (ℓ_0).

A segunda característica básica dos extensômetros é a sua sensibilidade. A sensibilidade é o menor valor de deformação que pode ser lido pela escala associada ao extensômetro. O termo sensibilidade não deve ser confundido com exatidão ou precisão, uma vez que os extensômetros podem ser projetados para ter a sua sensibilidade aumentada em muito. Porém, o atrito, ruídos, escorregamentos, etc., podem introduzir grandes erros e afetar a precisão e exatidão.

Em algumas aplicações são utilizados extensômetros com procedimentos adequados para trabalhar com sensibilidade de menos de 1,0 micra. Quando a sensibilidade não for muito importante, 50 a 100 μ são suficientes. O sistema de extensometria poderá neste caso ser menos complexo.

A terceira característica básica é o tamanho da faixa de medição, que é definida como a máxima deformação que pode ser gravada sem reiniciar ou reposicionar o aparelho.

O tamanho da faixa de medição e a sensibilidade estão relacionados, uma vez que extensômetros muito sensíveis respondem a pequenas deformações, e o intervalo de medição é limitado à leitura máxima do cursor de escala de medição. Costuma-se fazer o balanceamento entre a escala de medição e a sensibilidade, para obter bom desempenho em ambas as características.

¹ Em inglês: gauge length.

A última característica básica é a exatidão. Como já exposto, a sensibilidade não confere exatidão. Geralmente os instrumentos muito sensíveis são muito propensos a erros se não forem utilizados com o máximo cuidado. Em um extensômetro mecânico, as imprecisões podem advir da perda de movimento devido ao desgaste ou folga, ou do desvio dos componentes. Em todos os extensômetros há um erro de leitura se a saída do calibrador for anotada manualmente ou exibida em um multímetro digital (DALLY e SHUKLA, 2010).

2.2.2.3 - Os Tipos de Extensômetros

Os princípios físicos que têm sido utilizados pela extensometria são muito numerosos e um levantamento completo é muito longo.

Segundo vários autores, os princípios mais importantes empregados na construção de extensômetros podem ser usados como base para classificar os extensômetros.

Dally e Shukla (2010) classificaram os extensômetros em quatro grupos básicos:

1. mecânicos;
2. ópticos;
3. elétricos;
4. acústicos.

Almeida (2002) e Reinhorn (2010) acrescentaram a esta lista as técnicas dos vernizes frágeis e as técnicas pneumáticas.

2.3 - A Extensometria Óptica de Campo Inteiro

2.3.1 - Princípios Básicos da Extensometria Óptica

Segundo Gasvik (2002), a radiação eletromagnética visível, também conhecida como ondas de luz, é dotada dos mecanismos para transferir a energia eletromagnética através do espaço.

A luz pode ser descrita quantitativamente por certos parâmetros que incluem:

- amplitude;
- intensidade;
- coerência.

Segundo Fowles (1989), a radiação eletromagnética é criada pela oscilação de cargas elétricas. A frequência da oscilação determina o tipo de radiação emitida. As várias porções do espectro eletromagnético são classificadas pela frequência (ciclos por segundo ou hertz) e pelo comprimento de onda (μm , nm).

Se em uma dada fonte de luz todas as cargas oscilam em uníssono, a fonte é dita coerente. Se as cargas oscilam independentemente e randomicamente, a fonte é chamada incoerente.

Fontes ordinárias e naturais de radiação no espectro óptico são incoerentes, tais como lâmpadas de filamentos de tungstênio, lâmpadas fluorescentes, chamas, etc.

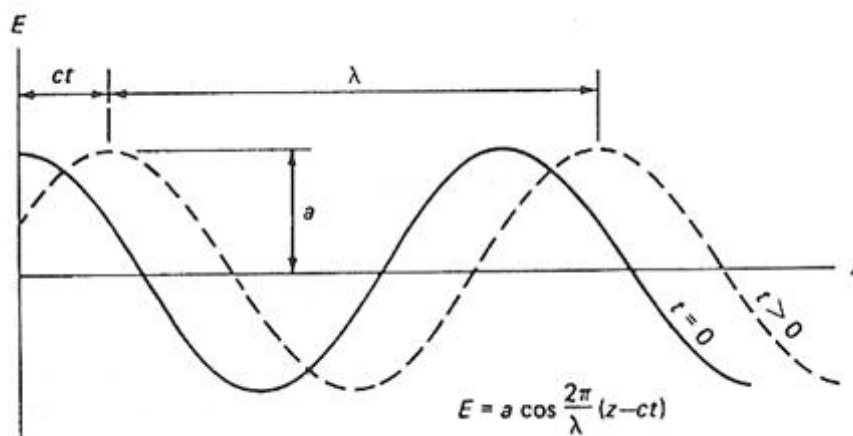
Fontes artificiais tais como as ondas de radio e micro-ondas geralmente são coerentes. Estas fontes de baixa frequência coerentes são basicamente osciladores, que utilizam equipamentos amplificadores tais como tubos de vácuo, transistores, etc. O desenvolvimento da amplificação óptica para os *lasers*, estendeu as fontes coerentes para o espectro óptico.

Segundo Dally e Shukla (2010), a luz pode ser representada pela onda transversal, e é possível expressar a magnitude do vetor elétrico da luz em termos de solução da equação da onda unidirecional. A Figura 2.12 mostra a intensidade do vetor luminoso como uma função da posição ao longo do eixo de propagação em dois instantes diferentes.

Se a luz emerge de uma fonte pontual suficientemente pequena, o campo eletromagnético pode ser considerado com variação senoidal no tempo e no espaço naquela direção de propagação. Este tipo de campo é chamado de “espacialmente coerente”.

Quando uma onda de luz, temporalmente e espacialmente coerente, projeta-se no ambiente, ela divide o mesmo em regiões igualmente delimitadas, onde, a qualquer instante, os campos magnéticos e elétricos definem planos (ou, no caso geral, esferas) no espaço, separados por uma distância de exatamente um comprimento de onda. Este fato cria condições naturais para realizar medições em um espaço iluminado com dimensão igual ou maior do que o comprimento de onda da luz.

Para se compreender a realização de uma medição por *moiré* interferométrico é necessário conhecer alguns conceitos associados à interferência entre frentes de onda coerentes. Para isso, inicia-se por analisar a interferência entre frentes de onda planas da Figura 2.13.



E = magnitude do vetor luminoso; c = velocidade de propagação; λ = comprimento de onda; t = tempo; a = amplitude; z = posição ao longo do eixo de propagação.

Figura 2.12- Intensidade do vetor luminoso como uma função da posição ao longo do eixo de propagação em dois instantes diferentes.

Fonte: (DALLY e SHUKLA, 2010).

Quando dois feixes de luz coerente se propagam no espaço com frentes de onda planas, 1 e 2 e se encontram com um ângulo de intersecção 2θ , as frentes de onda (w_1 e w_2), perpendiculares às direções de propagação, formam um ângulo 2θ entre si. As amplitudes A_1 e A_2 são idênticas e podem denominar-se como a sendo o comprimento de onda dos dois feixes λ . Como se pode ver, as frentes de onda w_1 e w_2 sobrepõem-se e, tratando-se de radiações coerentes, interferem entre si.

Por conseguinte, estão reunidas todas as condições para a formação de franjas de interferências construtivas e destrutivas. Devido às interferências construtivas e destrutivas entre as duas ondas, as franjas aparecem separadamente com um intervalo G .

Analisando a Figura 2.13 verifica-se que esse espaçamento pode ser obtido a partir de:

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2G}$$

$$f = \frac{2}{\lambda} \sin\theta$$

onde $f = \frac{1}{G}$ é denominado de frequência ou gradiente de franja.

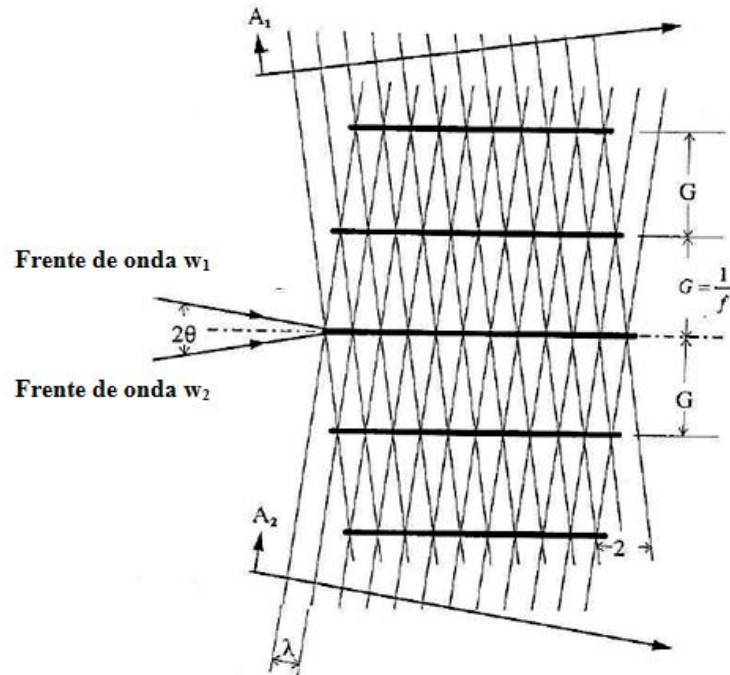


Figura 2.13 – Representação esquemática do princípio da interferometria entre duas ondas planas coerentes.
Fonte: (RIBEIRO, 2006).

Desta forma, verifica-se que, sobrepondo frentes de onda planas e coerentes convenientemente orientadas entre si, é possível gerar redes de franjas por redistribuição espacial da energia motivada por fenômenos de interferência.

Esta técnica é utilizada no *moiré* interferométrico para gerar redes (ou retículos) de referência.

2.3.1.1 - Retículos (ou Redes de Difração)

Na interferometria de *moiré*, utilizam-se retículos (ou redes) de difração nas superfícies a medir. A iluminação de um destes retículos por uma frente de onda plana provoca a divisão da radiação

incidente em múltiplas frentes de onda refletidas, ou transmitidas, que são geradas por difração. Estes retículos são, por isso, chamados de redes de difração. As direções de difração obedecem à equação da difração de redes:

$$\sin\beta = \sin\alpha + m\lambda f_s$$

onde m é o número de ordem da difração, f_s é a frequência do retículo do modelo, α é o ângulo de incidência e β_m é o ângulo da $m^{\text{ésima}}$ ordem de difração.

Na técnica de *moiré* geométrico (TMG), a frequência da rede f é geralmente inferior a 100 linhas/mm. O termo λf da equação acima é muito pequeno e, por conseguinte, $\beta_m \approx \alpha$. Isso indica que a ordem de difração não pode ser dividida. Em contrapartida, a frequência f_s da rede utilizada na técnica de *moiré* interferométrico é geralmente de 1200 linhas/mm e, por isto, as diferentes ordens de difração estão separadas por grandes ângulos (RIBEIRO, 2006).

2.3.1.2 – Fontes de Luz Utilizadas na Extensometria Óptica

Segundo Yatagai (2007), os dois principais tipos de fontes não coerentes, utilizadas na metrologia óptica são baseadas na irradiação térmica (as lâmpadas de tungstênio e as lâmpadas alógenas), e as baseadas na descarga elétrica em gases (as lâmpadas de vapor de mercúrio, xenônio, hidrogênio pesado ou sódio). O espectro de uma fonte não-coerente pode ser contínuo, ou então constituído por alguns espectros lineares agrupados por isso, nas medições que requerem luz monocromática, há a necessidade de se separar o espectro por meio de um filtro.

Os *lasers* são a principal fonte de luz coerente utilizada na metrologia óptica. A grande maioria dos *lasers* a gás (He-Ne, Ar, etc.) apresentam saída contínua e alta coerência. São aplicados não só na obtenção de interferência, mas também em várias outras aplicações metrológicas.

2.3.2 - O Estado da Arte da Fotomecânica

Segundo Huntley e Grédiac (2010), o termo fotomecânica refere-se à utilização de luz para medir as distribuições das quantidades tais como tensão, deslocamento, pressão, temperatura, índice de refração etc. em mecânica experimental de sólidos e experimentais de mecânica dos fluidos.

Por definição, a fotônica é a ciência e tecnologia na geração, controle e detecção da energia radiante.

A fotomecânica utiliza a fotônica para a medição de quantidades cinemáticas no ramo da mecânica. Ela tem se desenvolvido muito devido aos avanços recentes em campos tais como *lasers*, fibras ópticas, processamento digital de imagens e *hardware*.

Os métodos ópticos para determinação de deslocamentos e deformações estruturais e a extensometria óptica são sinônimos. A extensometria óptica é considerada um ramo da fotomecânica.

Na verdade, muitos avanços na óptica teórica e tecnológica só aconteceram porque foram estimuladas pela demanda da pesquisa em Engenharia. Hoje a fotomecânica resolve problemas fundamentais em áreas de rápido desenvolvimento tais como Mecânica dos Flúídos, Mecânica das Rochas, Biomecânica, Mecânica da Fratura, Ciência dos Materiais, Tecnologia de Manufatura e Métodos Não Destrutivos.

Durante muitos anos, a fotoelasticidade foi a principal técnica utilizada pela comunidade em fotomecânica.

A fotoelasticidade permitiu que as distribuições de tensões fossem determinadas para materiais isotrópicos que trabalham no regime linear em geometrias complexas de duas e três dimensões para as quais não existiam soluções analíticas.

O rápido desenvolvimento de computadores de alto desempenho e de *softwares* de análise por elementos finitos desde a década de 1980, no entanto, efetivamente eliminou o uso da fotoelasticidade clássica para tais aplicações.

Durante o mesmo período, aplicações estruturais de materiais avançados (por exemplo, fibras de carbono, epoxídicos ou compósitos de matriz metálica) tiveram também um rápido desenvolvimento.

Tais materiais são muitas vezes anisotrópicos, e possuem uma microestrutura complexa, com vários modos de ruptura, de modo que modelagem numérica sozinha é insuficiente para validar a análise, e necessita de experimentação complementar.

Existem restrições ao método da fotoelasticidade tradicional por ela ser capaz de fazer análises tridimensionais apenas em corpos transparentes. Por isto, a não transparência de muitos materiais tem impulsionado o desenvolvimento de abordagens alternativas para este método.

Ironicamente, o mesmo desenvolvimento do computador digital, que levou ao declínio da fotoelasticidade, junto com o rápido desenvolvimento do *laser* e da tecnologia de câmera CCD, também permitiu que uma nova geração de técnicas ópticas de campo inteiro evoluísse.

Um grupo de técnicas baseadas em interferometria surgiu a partir da década de 1960, iniciando com a interferometria holográfica (HI), seguido pela interferometria de padrão *speckle* eletrônicos (ESPI) e, em seguida, pela técnica de *moiré* interferométrico (TMI) desde o final da década de 1970.

Todos estes grupos de técnicas fornecem informações de deslocamentos na superfície de uma amostra opaca, a partir do qual o campo de deformação específica pode ser calculado por diferenciação numérica.

A técnica do ESPI despontou como opção preferida em muitos casos, graças à sua capacidade para exibir as franjas de deslocamento em tempo real.

A técnica da HI revigorou-se com o uso de modernos sensores de imagem de alta resolução.

A TMI tem a mais alta resolução espacial e relação sinal-ruído entre as três; no entanto, a necessidade de preparação e restrições sobre o tamanho da amostra tem limitado seu campo de atuação.

Duas outras técnicas interferométricas estão intimamente relacionadas e merecem uma menção.

A técnica de Interferometria de digitalização de luz branca (SWLI) e a tomografia de coerência óptica (OCT) são ambas baseadas no princípio de interferometria com baixa coerência. Neste caso, a luz com um amplo conteúdo espectral é usada de maneira que as franjas sejam vistas apenas naquelas regiões que correspondem às mínimas diferenças de caminho óptico entre as frentes de onda que se interferem.

Os perfis de superfície de materiais opacos podem ser determinados com alta precisão, no caso de SWLI, ou também a estrutura interna tridimensional dos materiais com imagens de fraca dispersão, no caso de OCT.

A extrema sensibilidade de todas as técnicas interferométricas alcançam uma faixa de deslocamento que varia desde a sub-micrométrica até dezenas de micrômetros. Isto, por vezes, acaba sendo mais uma desvantagem, do que uma vantagem, particularmente quando é preciso fazer medições em ambientes ruidosos.

Em decorrência disto, outras técnicas não-interferométricas, tais como o método de retículo ou a correlação de imagem digital (DIC) têm sido amplamente utilizados nos últimos anos.

As principais vantagens incluem a imunidade relativa às perturbações do ambiente; a simplicidade experimental; a fácil determinação de escala; e sensibilidade aos deslocamentos adaptados à faixa normalmente necessária para ensaios estruturais de grande e média escala.

A técnica do retículo consiste na análise de imagens de retículos, que são transferidos, gravados ou colados na superfície do modelo, a fim de rastrear o movimento dos pontos da amostra quando ele se deforma.

A técnica de correlação digital de imagens (DIC) é uma descendente direta da técnica conhecida como fotografia *speckle*, e está também intimamente relacionada com a imagem de velocimetria de partículas, que tem uso generalizado em mecânica de fluidos experimental.

O conceito básico do DIC considera que um padrão aleatório é aplicado à amostra; correlacionando sub-imagens do padrão de uma imagem de referência com uma imagem da amostra deformada, e pode deduzir-se um vetor de deslocamento para cada um dos pares de sub-imagens correlacionadas.

Uma classe final importante no arsenal das técnicas não interferométricas na fotomecânica é a chamada termografia infravermelha (IR), que envolve o uso de uma câmera de infravermelho para detectar as pequenas variações de temperatura associadas a alterações na carga aplicada ao modelo. Estas variações podem ser analisadas no âmbito da termoelasticidade (análise de tensões termoelásticas).

Recentemente foram processados campos de variação de temperatura para recuperar as fontes de calor que estão diretamente relacionadas com alguns fenômenos irreversíveis, ocorrendo em engenharia de materiais, tais como danos ou plasticidade.

Feng (2009) introduziu um novo sensor de fibras ópticas para monitorar a integridade estrutural de pontes.

Segundo Albertazzi , Sousa e Pezzota (2003), a metrologia óptica ainda é muito pouco conhecida no Brasil. No exterior, ela já é conhecida e utilizada há mais tempo.

2.3.3 - A Classificação dos Métodos Ópticos de Campo Inteiro

Segundo Sharpe (2008), as técnicas extensométricas podem ser classificadas em duas grandes famílias:

- as técnicas de contato;
- as técnicas de não-contato.

Esta classificação diz respeito ao contato físico entre o instrumento de medição e o corpo-de-prova.

São consideradas técnicas de contato:

- os extensômetros elétricos (*strain-gages*);
- os extensômetros mecânicos;
- os extensômetros de fibras ópticas.

São consideradas técnicas de não-contato:

- a correlação digital da imagem (DIC) para medição de formas e deslocamentos;
- o *moiré* de interferência mecânica (*moiré* geométrico, de sombra, de reflexão e de projeção);
- o *moiré* por interferência óptica (*moiré* interferométrico);
- os métodos *speckle*;
- a holografia;
- a fotoelasticidade;
- a análise de tensões por termoelasticidade;
- a caracterização de materiais por foto-acústica;
- a análise de tensões por raios -X.

As técnicas ópticas de campo inteiro pertencem ao segundo grupo.

Os vários métodos ópticos de campo inteiro para medição de grandezas cinemáticas, encontrados na literatura, foram classificados por Grédiac (2004) e Surrel (2004a), e são apresentados no quadro 2.2.

Um primeiro critério de classificação é a natureza do fenômeno físico envolvido, classificando os métodos ópticos em:

- técnicas de luz branca (não interferométrica);
- técnicas interferométricas.

Outros critérios são:

- a natureza da medida (deslocamento, rotação ou deformação);
- o padrão característico da superfície analisada com técnicas de luz branca (periódica ou aleatória);
- a forma como a luz é refletida pela superfície dos objetos no caso das técnicas interferométricas (luz difusa ou difratada).

As técnicas de luz branca são baseadas na análise de padrões que acompanham as deformações da superfície de interesse, de um corpo material que está sujeito a cargas externas. Considera-se que a iluminação local incidente seja mantida constante.

A medição é feita pela análise da variação da distribuição espacial da intensidade da luz refletida.

Quadro 2.2. Métodos ópticos de campo inteiro (grandezas cinemáticas.)².

Fonte: (GRÉDIAC, 2004) e (SURREL, 2004a).

Técnicas de Luz Branca		
Medida ^(a)	Padrão periódico	Padrão <i>Speckle</i>
u_x, u_y ^(b)	<i>moiré</i> geométrico plano (CLOUD, 1998) e (POST, IFJU e HAN, 1994)	fotografia <i>speckle</i> digital (SJÖDAHL, 1998)
	<i>método do retículo</i> (SURREL, 1999) (SURREL, 2004c)	correlação digital de imagens (SUTTON, MCNEILL, <i>et al.</i> , 1999)
	método do rastreamento do ponto (DOUMALIN, 2000)	
u_z	<i>moiré</i> de sombra e de projeção (CLOUD, 1998) e (POST, IFJU e HAN, 1994)	
	projeção do retículo (LE MAGOROU, BOS e ROUGER, 2002)	
u_x, u_y, u_z ^(c)		correlação <i>stereo</i> (SYNNERGREN e SJÖDAHL, 1999)
θ_x, θ_y ^(d)	<i>moiré</i> de reflexão (CLOUD, 2006)	
	defletometria (SURREL, 2004b)	
Técnicas interferométricas		
Medida ^(a)	Luz com Difusão	Luz com Difração
u_x, u_y, u_z	interferometria <i>speckle</i> (CLOUD, 1998)	interferometria <i>moiré</i> (POST, IFJU e HAN, 1994)
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}$	<i>sherografia speckle</i> (HUNG e HO, 2005)	<i>sherografia com retículos</i> (LEE, MOLIMARD, <i>et al.</i> , 2004)
<p>(a) u = deslocamento; θ = rotação; ε = deformação normal; γ = deformação tangencial.</p> <p>(b) as medições no plano (u_x, u_y) são complementadas com os deslocamentos fora do plano (u_z).</p> <p>(c) a calibração da câmera é necessária.</p> <p>(d) a medição das rotações é complementada com as coordenadas de posição.</p> <p><i>Speckle</i>=granulado óptico.</p>		

2.3.4 - Parâmetros para a Escolha de Métodos Ópticos de Campo Inteiro

A escolha de um método óptico para uma determinada aplicação não é uma tarefa trivial (GRÉDIAC, 2004). Contudo, muitos critérios podem ser considerados nesta escolha, tais como:

² A Fotoelasticidade não foi incluída por basear-se em princípios físicos não cinemáticos.

- o custo;
- a simplicidade de execução;
- o desempenho (resolução, resolução espacial, etc.);
- a grandeza a medir (deslocamento, deformação, etc.);
- o intervalo esperado de variação da medição (pequenas ou grandes deformações);
- a sensibilidade às vibrações;
- tamanho da região de interesse (macro, micro ou nano).

Em aplicações onde a principal quantidade cinemática é o campo de deformações, os métodos ópticos podem ser utilizados para caracterizar os parâmetros constitutivos dos materiais. Neste caso, as componentes do campo de deformações são determinadas a partir do campo inteiro de deslocamentos por algum método numérico adequado de diferenciação e filtro de ruídos. Este processo não é trivial porque as medições contêm uma série de ruídos e por isto, os dados podem ser perdidos em alguns pontos. São poucos os métodos existentes para fazer esta diferenciação ópticamente e que forneçam diretamente o campo de deformação da superfície, como acontece nas técnicas de sherografia.

Os arranjos das técnicas de luz branca são mais simples do que as técnicas interferométricas, e não exigem a utilização de equipamentos especiais como os *lasers* e as mesas antivibratórias. Além disto, eles podem ser utilizadas junto com aparatos convencionais, tais como máquinas de ensaios universal, por exemplo.

2.4 - As Técnicas de *Moiré*

2.4.1 - O Fenômeno *Moiré*

Segundo vários autores, a palavra *moiré* é francesa e se refere ao brilho úmido da seda, onde se alternam bandas brilhantes e escuras. O efeito *moiré* aparece quando dois padrões uniformes de linhas ou pontos repetidos de mesmo espaçamento, ou quase idênticos, são superpostos. É comum aparecer este efeito quando duas cercas de jardim paralelas são vistas uma através da outra, ou no caso de duas partes de janelas com padrões repetidos iguais.

A Figura 2.14 mostra franjas obtidas a partir de retículos formados por famílias de curvas de período constante.

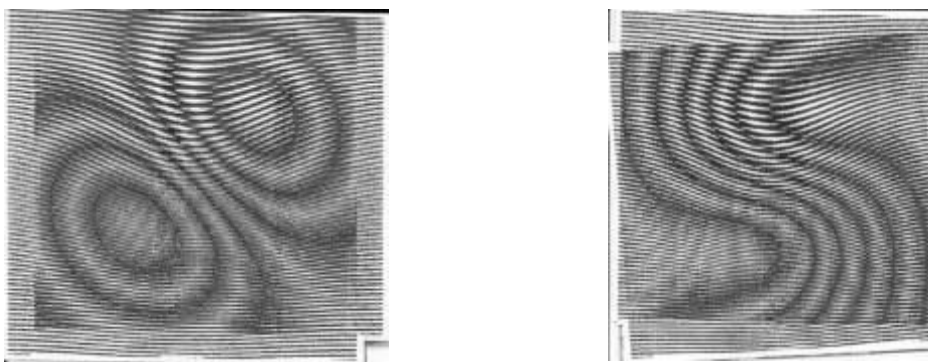


Figura 2.14-Padrões de franjas de *moiré* geradas por superposição de retículos de período constante.

Fonte: (AMIDROR, 2000).

Acredita-se que a primeira aplicação prática do efeito *moiré* tenha sido a amplificação dos defeitos das linhas dos retículos, também conhecidos como redes de difração. Nestas aplicações, as franjas de *moiré* fornecem informações relacionadas com erros nos espaçamentos, paralelismo e linearidade das linhas dos retículos.

O efeito *moiré* é um elemento indesejável em trabalhos fotográficos e na indústria gráfica em geral, sendo considerado um ruído. Na impressão colorida, um fotolito reticulado é processado fotograficamente, por isso, a sua definição é obtida por pontos pequenos que tem ângulos diferentes para um mesmo filme. Há então a superposição de muitas imagens, cuja direção deve ser controlada para minimizar os efeitos *moiré*.

Observa-se ³ o efeito *moiré* como ruído manifestando-se em transmissões de TV quando existe a interferência entre os retículos da tela e alguns tipos de padrões. Entre estes tipos de padrões mais comuns estão os tecidos listrados e os chamados *pied-de-poulet*.

O primeiro trabalho sobre a utilização das franjas de *moiré* é atribuído por Sciammarella (1982) a Rayleigh (1874), quando este notou a formação de franjas ao superpor duas telas de espaçamento constante.

O estudo das relações entre os espaçamentos e inclinações das franjas de *moiré* e os padrões e geometria dos retículos que as originaram fornecem informações que governam o comportamento geral do fenômeno.

Segundo Sciammarella (1982), uma das primeiras utilizações científicas do fenômeno de *moiré* foi o estudo da deformação da mica, feita por Mulot (1925).

Segundo Cloud (1998), a primeira interpretação geométrica do fenômeno é atribuída a Tollenaar (1945), quando ele descobriu que as franjas de *moiré* são na verdade amplificadoras de movimento, e que poderiam dar uma alta sensibilidade a medições de movimentos relativos. O mesmo autor cita ainda vários autores que a partir daí empregaram o fenômeno para estudar deslocamento, deformação e tensão, e introduziram a interpretação das franjas de *moiré* como componentes dos deslocamentos em problemas de elasticidade plana, entre eles, Weller e Shepard (1948) e Dantu (1954). Posteriormente, o método foi refinado e aplicado numa grande variedade de circunstâncias por Riley e Durelli (1962), Theocaris (1969) apud Cloud (1998), Durelli e Parks (1970) e Oster e Nijishima (1964), os quais fizeram os primeiros estudos para estabelecer as relações entre retículos superpostos e as franjas de *moiré* resultantes. O fenômeno das franjas de *moiré* é usado na análise de deformação como um método experimental para determinar os componentes do deslocamento (u , v) ou de deformações (ϵ_x , ϵ_y) na superfície plana de corpos materiais sujeitos a carregamentos.

Takasaki (1970), (1973), utilizou a sobreposição de um retículo sobre a sua própria sombra, que é denominado técnica de *moiré* de sombra (TMS), para medir o relevo de objetos e pessoas. Nesse

³ Observação do autor.

caso, as franjas de *moiré* são constituídas por um conjunto de pontos de mesma cota, semelhantes às curvas de nível de mapas topográficos.

Segundo Dally e Shukla (2010), Ligtenberg (1954) mediu as rotações da elástica para determinar as curvaturas e a distribuição dos momentos fletores em modelos de lajes planas pela chamada técnica de *moiré* de reflexão (TMR).

Halioua, Krishnamurthy et al. (1983) fizeram aplicações da técnica de *moiré* de projeção (TMP), para topografia tridimensional. Os resultados experimentais foram apresentados para arranjos com projeção simples e dupla, para testes com um objeto 3-D genérico e na superfície de um plano inclinado. Foram mostradas franjas de contorno para os ângulos de inclinação até 80° e implementação prática de um sistema de processamento on-line

Lino (2008) utilizou a técnica TMP, com deslocamento de fase, e explorou a sua aplicação em vários problemas de Engenharia Agrícola, onde fez aplicação de *softwares*, tais como ImageJ, Rising Sun Moiré, SCILAB/SIP e Excel, entre outras rotinas. O seu trabalho teve como objetivos a obtenção da definição dos contornos topográficos de animais e produtos vegetais, projetos de elementos de máquinas agrícolas, arquitetura de plantas, interações máquina-solo e máquina-planta, contato pneu-solo, seleção e classificação de produtos agrícolas, determinação de propriedades mecânicas de solo e vegetais, estudos sobre práticas de preparo do solo, projetos de embalagens para produtos agrícolas e outros.

Segundo Czarnek (1993), a técnica de *moiré* interferométrico (TMI) foi introduzida por Guild (1956). Posteriormente, Post (1968) e (1979), desenvolveu técnicas avançadas utilizando a interferometria *moiré*, obtendo grande aumento na sensibilidade do método.

A medição de deformação de uma ponte pela técnica da dupla exposição fotográfica foi feita por Forno et al. (1991).

O advento da multiplicação óptico-digital de franjas proposto por Post, Ifju e Han (1994) possibilitou o aumento da sensibilidade de medição da *TMG* e *TMS* utilizando retículos de baixa

frequência. Este fato permitiu que a sensibilidade da TMG pudesse ser equiparada à da TMI em algumas aplicações.

Guralnik e Suen (2000) utilizaram a técnica de *moiré* de sombra (TMS) para mapear as condições de superfície de pavimentos viários.

Os trabalhos de Affonso, Fabbro e Demarzo (2003) e de D'Acquisito, La Pica e Siddiolo (2007), demonstraram a aplicabilidade da técnica de *moiré* de sombra (TMS) para estudo de corpos-de-prova de madeira.

Yatagai (2007) cita a medição de deformação de sólidos por meio de técnicas topográficas *moiré*. A Figura 2.15 mostra um exemplo de aplicação da técnica de *moiré* de projeção (TMP) para a medição de deformação.

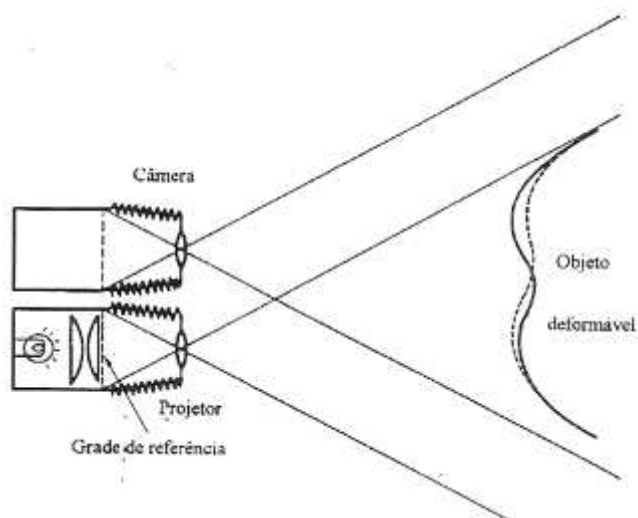


Figura 2.15 – Exemplo de medição de deformações com a Técnica de *moiré* de Projeção(TMP).
Fonte: (YATAGAI, 2007).

Os retículos são projetados no corpo, e a sua imagem é formada no sistema óptico e gravada fotograficamente. Em seguida, o objeto é deformado e a imagem obtida nesta condição é sobreposta àquela obtida antes da deformação, produzindo as franjas de *moiré*. As franjas obtidas desta maneira são uma aproximação das curvas de nível dos deslocamentos que o objeto sofreu.

O grupo de estudos de *moiré* da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP utilizou a técnica de *moiré* de sombra (TMS) para medir deformações e tensões em aplicações de mecânica dos sólidos experimental: em dentes de engrenagens (GAZZOLA, CARDOSO, *et al.*, 2009a); em feixes de toras de madeira sob flexão (GAZZOLA, *et al.*, 2009b), mostrado na Figura 2.16; em corpos descontínuos com concentração de tensões (GAZZOLA, DAL FABBRO, *et al.*, 2009c); e em viga de madeira em flexão (SANTOS, PRADO, *et al.*, 2009).

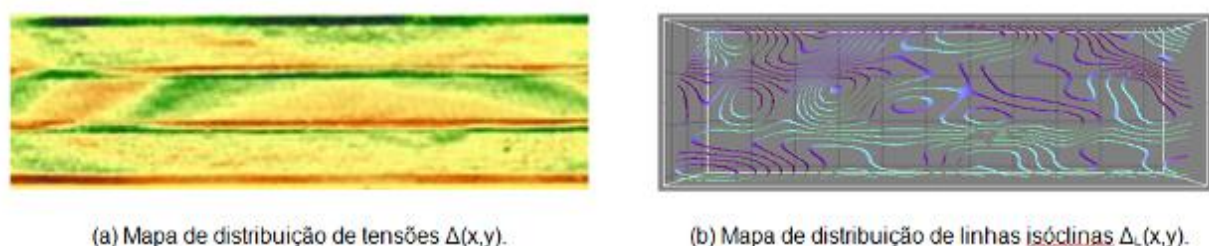


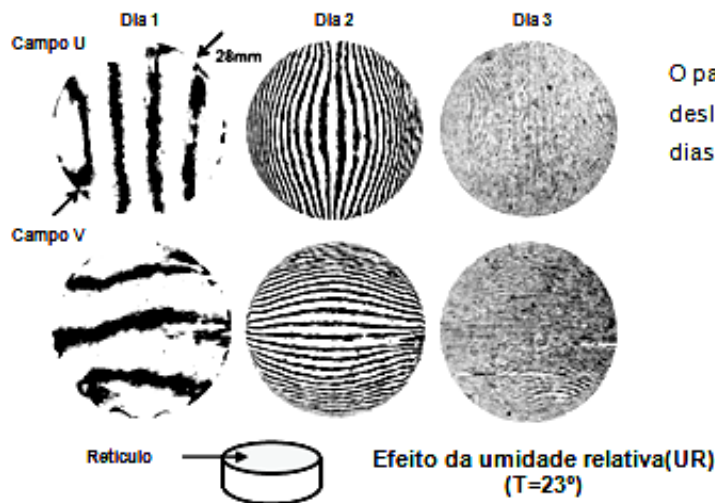
Figura 2.16-Mapa de distribuição de tensões e isóclinas em feixe de toras.

Fonte: (GAZZOLA, SANTOS, *et al.*, 2009b)

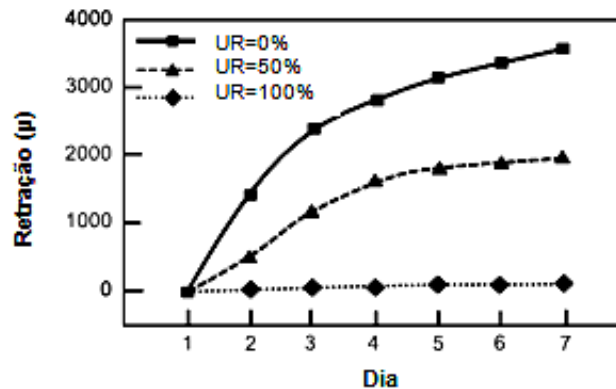
Xie, Kishimoto *et al.* (2007) desenvolveram o nano-*moiré* utilizando a interferência do retículo do microscópio de alta resolução com o retículo do modelo.

Chen, Ferraro *et al.* (2010) utilizaram a Interferometria *moiré* (TMI) e métodos inversos para determinar coeficientes de retração em cimento, argamassa e concreto. Na Figura 2.17, a retração do cimento pode ser vista em função do tempo para vários teores de umidade. A técnica aqui empregada utilizou procedimentos de cura que haviam sido desenvolvidos para determinar tensões residuais em compósitos. Neste caso, foi aderido um retículo ao modelo na fase inicial de endurecimento do cimento. O retículo atua como uma referência a partir da qual as subseqüentes deformações são medidas em um período de 7 dias.

O método foi utilizado em paralelo com um modelo de elementos finitos (FEM), que modelou o retículo como uma membrana semipermeável.



O padrão de franjas mostram os campos de deslocamentos U e V, para os primeiros 3 dias.



A retração média (μ) do corpo-de-prova de cimento versus tempo (dias), para várias combinações de umidade.

Figura 2.17- Retração em um corpo-de-prova de cimento.
Fonte: (CHEN, FERRARO, *et al.*, 2010).

2.4.2 - As Técnicas de Moiré por Interferência Mecânica (ou Geométrica) para Determinação do Deslocamento no Plano

Quando duas estruturas periódicas, ou quase-periódicas, são superpostas, aparecem franjas geradas por sua interferência mecânica. Estas estruturas são chamadas retículos e podem apresentar-se de vários formatos tais como linhas paralelas, linhas cruzadas, pontos, etc., e a sua constituição pode ser física ou virtual. Este é o princípio básico de todos os tipos de *moiré*. A análise do padrão de interferência gerado permite a quantificação das diferenças de passo, e ou orientação, entre estas estruturas superpostas.

O tipo de *moiré* que faz a medição de deslocamentos no plano tem o nome do tipo de interferência que o produziu, e é chamado de técnica de *moiré* geométrico (TMG). Esta técnica

constitui a base deste trabalho. A particularidade desta técnica é a necessidade de um retículo fixo ao corpo deformável.

Segundo Durelli e Parks (1970), a superposição de retículos produz um efeito óptico (franjas) por interferência mecânica que pode ser descrito conforme a equação 2.9:

$$I_m(x, y) = I_0(x, y) + b_1 \cos \left[2\pi \frac{u(x, y)}{g} + \alpha \right] + b_2 \cos \left[2\pi \frac{2u(x, y)}{g} + 2\alpha \right] + b_3 \cos \left[2\pi \frac{3u(x, y)}{g} + 3\alpha \right] + \dots = I_0(x, y) + \sum_{k=1}^K b_k \cos \left[k \left(2\pi \frac{u(x, y)}{g} + \alpha \right) \right] \quad (2.9)$$

onde:

$I_0(x, y)$ representa as variações de intensidade do fundo;

b_k e k descrevem o perfil das franjas de *moiré* (usando a notação de *Fourier*);

α é o deslocamento das franjas;

g é o passo (período) do retículo aderido ao corpo-de-prova (retículo do corpo).

Esta equação representa o relacionamento contínuo entre intensidades e deslocamentos, e forma a base da análise manual (geométrica) e digital das franjas de *moiré*.

Os retículos são formados por uma parte transparente, e um conjunto de linhas pretas paralelas aplicadas na superfície em estudo.

O retículo do corpo indeformado é igual ao retículo de referência. Quando houver coincidência perfeita entre a posição das linhas do retículo de referência e a das linhas do retículo do corpo, existirá a máxima intensidade de luz transmitida através do conjunto; ver Figura 2.18. De maneira oposta, quando não existir nenhuma coincidência entre as mesmas, haverá a mínima intensidade de luz transmitida através do conjunto. As posições relativas entre os dois retículos são definidas pelo parâmetro α e não tem influência importante quando a intensidade de iluminação é mantida uniforme. Quando as linhas estão coincidindo $\alpha = 0$.

No caso dos retículos de referência e do corpo estarem alinhados, a máxima intensidade de luz será transmitida

Quando o corpo for deformado pelo carregamento, a densidade das linhas do retículo do corpo aumentará no caso de compressão, ou diminuirá no caso de tração. Neste caso, aparecerão variações nas intensidades luminosas que se alternarão entre os limites de regiões absolutamente

escuras (não coincidência perfeita entre linhas) e absolutamente claras (coincidência perfeita das linhas). Se δ for considerada a distância entre os picos de onda de máxima transmissão de luz como sendo a distância entre as franjas de *moiré*, pode-se dizer que em qualquer ponto do corpo a deformação pode ser calculada, aproximadamente, pela divisão do passo do retículo g pela distância entre as franjas δ (Figura 2.18).

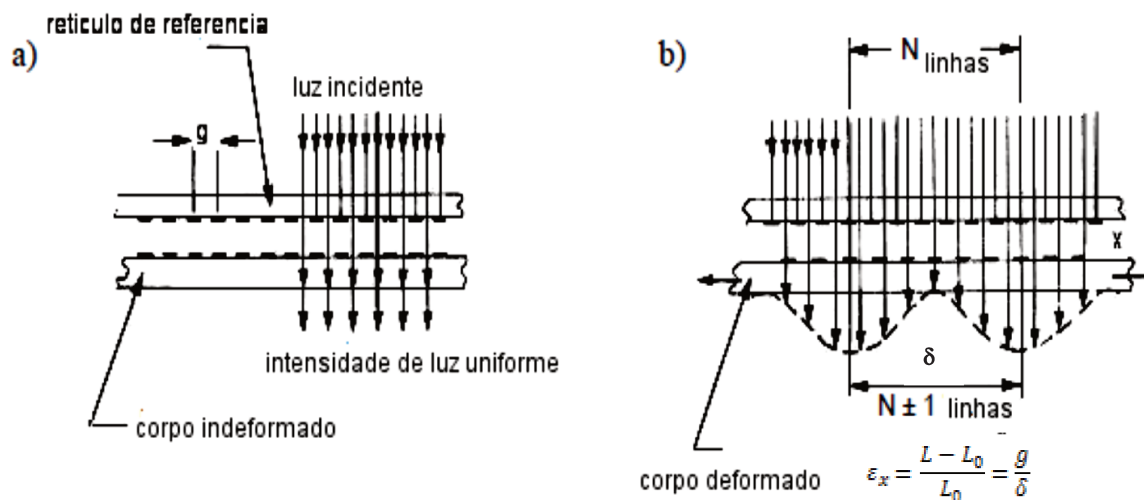


Figura 2.18 Diagramas representativos da formação das franjas de *moiré*: interação entre o retículo de referência e o retículo do corpo: a) corpo indeformado; b) corpo deformado.

Fonte: (SPOTS, 2005).

Note que a franja de *moiré* é o lugar geométrico da linha de deslocamento constante u (ou v) e, portanto, um padrão de franjas representa um mapa de isodeslocamentos (PATORSKY, 1993).

Ao longo da franja o valor do deslocamento u é constante e a diferença de valor de deslocamento entre duas ordens de franja consecutivas é $\Delta u = g$.

Esta descrição é basicamente o traçado da função $u(x, y) = C$, com o valor da constante C crescendo ou decrescendo de uma franja para outra do valor g , conforme a ordem da franja N .

Usualmente, para medir as mudanças havidas nos espaçamentos entre os retículos antes e depois do carregamento, são utilizadas técnicas de análise de imagens. Os deslocamentos e as deformações ponto a ponto são calculados a partir dos dados extraídos por estas técnicas.

Segundo vários autores, os retículos usados para produzir franjas de *moiré* podem ser uma série de linhas retas paralelas, uma série de linhas radiais divergindo de um ponto central, uma série de

círculos concêntricos ou uma malha de pontos circulares (DANTU, 1954) apud (CLOUD, 1998), (DURELLI e PARKS, 1970), (POST, IFJU e HAN, 1994), e (AMIDROR, 2000).

A principal dificuldade encontrada é a transferência destes retículos para o corpo material, o que pode ser feito por impressão, carimbo, gravação, ranhuras, revestimento ou fotolitografia (PARKS, 1993), (TAKEDA, OGIHARA, *et al.*, 1998), (SPOTS, 2005).

Muitas vezes os retículos do modelo são constituídos por uma fina película de emulsão que recebe uma impressão fotográfica por contato do retículo de referência.

Para proceder à análise de tensões-deformações, o retículo mais utilizado é o de linhas retas paralelas igualmente espaçadas, preferencialmente com barras opacas e espaços transparentes de igual largura, o que produz 50% de passagem da luz.

Estes retículos também são chamados de grades ou grelhas ⁴.

Quando dois conjuntos de linhas paralelas estão cruzados perpendicularmente são chamados de retículos em cruz ⁵. Ver Figura 2.19.

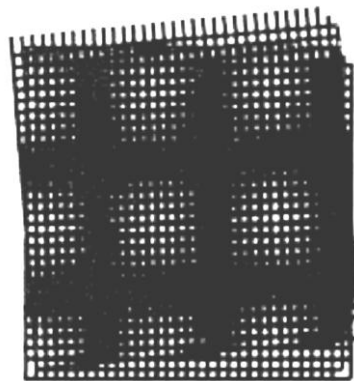


Figura 2.19-Franjas de interferência mecânica produzidas pela rotação de dois retículos em cruz.

Fonte: (WOLFE, ROWLANDS e LIN, 1994)

Retículos muito espaçados, com cerca de 2 mm ou mais já não produzem franjas de *moiré*, mas poderão ser utilizados pelo chamado método do retículo ⁶.

Quando existe a superposição de dois retículos próximos, de frequência maior do que 1 linha por mm, o efeito *moiré* aparece.

O número de linhas por unidade de comprimento também é chamado de densidade do retículo.

⁴ Em inglês: *grids, gratings* ou *grills*.

⁵ *Idem*: *Cross gratings*

⁶ *Idem*: *Grid method*.

A Figura 2.19 mostra o aspecto das franjas formadas pela superposição rotacionadas de dois retículos em cruz.

Para pequenas densidades de retículo é possível medir grandes deslocamentos utilizando luz branca, já para densidades intermediárias (frequência espacial superior a 40 linhas/mm) é necessário utilizar luz monocromática e quando a densidade da rede for superior a 100 linhas por mm, os problemas de difração, que advêm dessa elevada frequência, obrigam à utilização de luz coerente (RIBEIRO, 2006).

Os retículos do modelo, e de referência, utilizados na técnica de *moiré* geométrico (TMG), são de baixa frequência (de 1 a 80 linhas por mm) e da forma mais usual, são produzidos por linhas paralelas.

A técnica das franjas de *moiré* pode ser utilizada para medir deslocamento ou deformação, independentemente da magnitude de deformação, temperatura de modelo, duração do ensaio, frequência ou velocidade de ensaio.

Enquanto o retículo propriamente dito é composto por 1 a 100 linhas por mm, normalmente não visíveis, o padrão de franjas de *moiré* é mais espaçado. Veja na Figura 2.19, que a espessura e o espaçamento das franjas são muito maiores do que a espessura e espaçamento das linhas dos retículos.

Em outras palavras, as franjas são visíveis a olho nu, pois, possuem a frequência da componente vibratória mais baixa e por isto, a captura da sua imagem não exige uma câmera de alta resolução.

Resumindo, a TMG é simplesmente a comparação entre um retículo do modelo, deformado pelo carregamento, e um retículo mestre indeformado, utilizado como comprimento padrão, para medir o deslocamento e a deformação.

2.4.3 - Aplicações da Técnica de *Moiré* Geométrico (TMG) para Medições no Plano

Segundo SPOTS (2005), as aplicações típicas da TMG para medição no plano são medições de deslocamentos e deformações:

- em altas temperaturas (tratamentos térmicos; soldagem, tensões térmicas, etc.);
- elásticas e plásticas de grande intensidade, sem efeitos de reforço, em filmes finos, em materiais de baixo módulo de elasticidade;
- para análise em duas e três dimensões de modelos transparentes usando o princípio do retículo incorporado;
- absolutas, para estabelecer propriedades de materiais, medições de estabilidade de longo prazo, etc.);
- em grandes estruturas por períodos de tempo prolongado.

A Técnica de *Moiré* Geométrico (TMG) clássica considerada para as aplicações indicadas acima, tem sido diferenciada da Técnica de *Moiré* Interferométrico (TMI), por não utilizar interferômetros, utilizar luz branca e por utilizar retículos com frequências abaixo de 100 linhas/milímetro.

Neste trabalho, espera-se que a sensibilidade de medição da TMG clássica seja aumentada através da multiplicação de franjas. Por isto, foram relacionadas abaixo algumas aplicações, antes exclusivas da TMI, que, eventualmente, também poderão ser realizadas pela TMG com sensibilidade melhorada.

Hoje, a interferometria moiré (TMI) é usada, segundo Chen et al. (2010), para muitos estudos:

- materiais policristalino;
- materiais piezoelétricos;
- biomecânica;
- elementos estruturais;
- juntas estruturais;
- medição de tensão residual;

- calibração de pressão manométrica e *strain-gages*.

Segundo Post, Ifju e Han (1994):

- compósitos de laminados em compressão: efeitos de borda-livre;
- tensões térmicas próximas à interface de uma junta bi-material;
- compósitos texturados;
- deformações térmicas em circuitos impressos em placas eletrônicas;
- estudos em compósitos avançados (inclusive compósitos do tipo metal-matrix);
- metalurgia, mecânica da fratura, carregamento dinâmico;
- microscopia por moiré interferométrico microscópico;
- determinação de parâmetros em mecânica de estruturas;
- em superfícies curvas, sob certas restrições (SHARPE, 2008).

2.4.4 - A Sensibilidade das Técnicas de *Moiré*

A sensibilidade das TM depende principalmente do período do retículo; um período menor fornece uma sensibilidade maior, o que é desejável para medições de deformações no plano, quando se necessitam medir deslocamentos muito pequenos. Sciammarella (1982) afirma que usualmente os períodos g variam de 1 a 40 linhas/mm, porém densidades maiores podem ser utilizadas. Asundi (1998), afirma que a frequência típica dos retículos usada é de 20 a 40 linhas/mm para a técnica de *moiré* geométrico (TMG), e de 1000 a 2000 linhas/mm para a técnica de *moiré* interferométrico (TMI), sendo a sensibilidade típica (deslocamento por ordem de franja) da ordem de 0,5 μm para a TMI, 25 μm para a TMG e 100 μm para TMS.

Han e Post (2008) fizeram medições com o *moiré* de sombra utilizando a distância não-zero de Talbot, para aumento do contraste das franjas, e incrementos na sensibilidade da TMS com precisão da ordem de 50 μm .

Para as TM de Sombra e de Projeção, a sensibilidade de medição varia com os ângulos de iluminação e observação em relação à normal ao plano do retículo de *moiré*. Aumentando-se esses ângulos, ou apenas um deles, aumenta-se também a sensibilidade (LINO, 2002).

Quadro 2.1. Frequência das linhas para as técnicas de *moiré* (TM) e a sensibilidade de cada uma.

Fonte: (ASUNDI, 1998), (SCIAMMARELLA, 1982).

TM	Frequência (linhas/mm)	Sensibilidade (μm)
De sombra (TMS)	< 20	100
Geométrico Plano (TMG)	20 a 40	25
Interferométrico (TMI)	1000 a 2000	0,5

Segundo Wang e Dai (1999) as frequências de retículos utilizados nesses métodos são geralmente inferiores a:

- 40 linhas/mm para a TMG devido aos fenômenos de difração nos retículos acima deste valor;
- 2400 linhas/mm para a TMI por causa da restrição do comprimento de onda do *laser* visível.

Segundo SPOTS (2005), de uma maneira geral, a sensibilidade básica da medição é afetada por:

- o passo do retículo g ;
- o contraste do padrão *moiré*, que é função do arranjo do retículo;
- a resolução do sistema de aquisição (CCD ou CMOS câmera);
- é possível aumentar a sensibilidade aplicando-se um método de deslocamento de fase.

2.4.5 - A Exatidão das Técnicas de *Moiré*

A exatidão dos resultados está diretamente relacionada com a qualidade do retículo e os requisitos são:

- uniformidade do passo (g) através do retículo;
- exatidão absoluta do passo;
- contraste das bordas das linhas;
- condições de aquisição da imagem;
- a igualdade entre o deslocamento da superfície do modelo e do retículo a ele fixado.

Segundo SPOTS (2005), a exatidão do algoritmo do método de deslocamento de fase ou de multiplicação de franjas utilizado também afetará os resultados. As típicas exatidões dos métodos de deslocamento são:

- deslocamento de fase temporal = $g/40$;
- deslocamento de fase espacial = $g/20$ (utilizada em medições dinâmicas).

2.4.6 - Teoria da Formação Básica de Franjas para o Deslocamento no Plano

Segundo Phillips (2001), considera-se inicialmente o tipo mais simples de franjas de *moiré*, que é produzido pelo alongamento do corpo-de-prova na direção normal à do retículo do modelo.

O corpo-de-prova da Figura 2.20 está sujeito a uma deformação axial de alongamento = 20% na direção x e a uma deformação transversal de encurtamento = - 10% na direção y , que correspondem a grandes deformações produzidas por um esforço de tração uniaxial na direção x . Seja a coordenada x medida a partir de um ponto onde duas linhas escuras dos retículos estão alinhadas.

Ao longo do eixo $+x$, vê-se que o próximo ponto onde os espaços entre os retículos escuros estão alinhados novamente corresponde, na configuração deformada, ao local onde deslocamento relativo u é exatamente igual ao período (ou passo) g do retículo.

Por definição, as franjas de *moiré* são o lugar geométrico onde o espaço entre as linhas escuras dos retículos estão alinhados. Numerando as franjas algebricamente começando com $N = 0$ na franja de referência (em $x=0$), então a franja $N = +1$ é o lugar geométrico dos pontos nos quais o deslocamento relativo $u = +1 g$, e respectivamente a franja $N = -1$ corresponde a $u = -1 g$, e assim sucessivamente.

De uma maneira geral pode-se dizer que o deslocamento relativo u é dado por:

$$u = Ng \quad (2.10)$$

onde:

u = deslocamento relativo na direção considerada x ;

N = ordem da franja;

g = período do retículo.

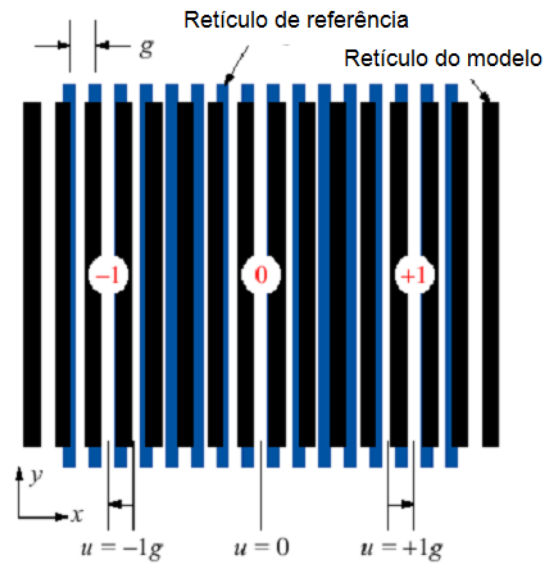


Figura 2. 20-Alongamento na direção x ($\epsilon = 20\%$).

Fonte: (PHILLIPS, 2001).

Cabe lembrar que o deslocamento é sempre referido à posição original (retículo de referência).

Esta relação muito simples vale para toda análise de *moiré*.

A Equação 2.10 é também expressa na forma:

$$u = N/f \quad (2.11)$$

, onde f é chamada de frequência espacial do retículo, dada por:

$$f = 1/g \quad (2.12)$$

Em 10 mm de comprimento do modelo o deslocamento relativo é de:

$$u = 10 \times 0,019 = 0,19 \text{ mm}$$

O máximo número de franjas observáveis em cada 10 mm de comprimento será:

$$N = u/g = 0,19/0,025 = 7,6 \text{ franjas}$$

É um número relativamente alto de franjas, mas foi obtido em um material de módulo de elasticidade baixo (aproximadamente metade do concreto⁷), e levando o material até a ruptura. Neste caso, foi assumida uma distribuição uniforme de deformações.

Outro caso típico com o padrão de franjas de *moiré* geométrico é o obtido através da transmissão da luz através dos retículos do modelo e de referência, em um modelo transparente mostrado na Figura 2.22. Neste caso os retículos do modelo indeformado, e o de referência, tinham $f = 40$ linhas por mm ($g = 0,025$ mm).

Existe a formação de 32 franjas no comprimento base de 25 mm. Portanto, a variação de comprimento é de:

$$u = Ng = 32 \times 0,025 = 0,8 \text{ mm}$$

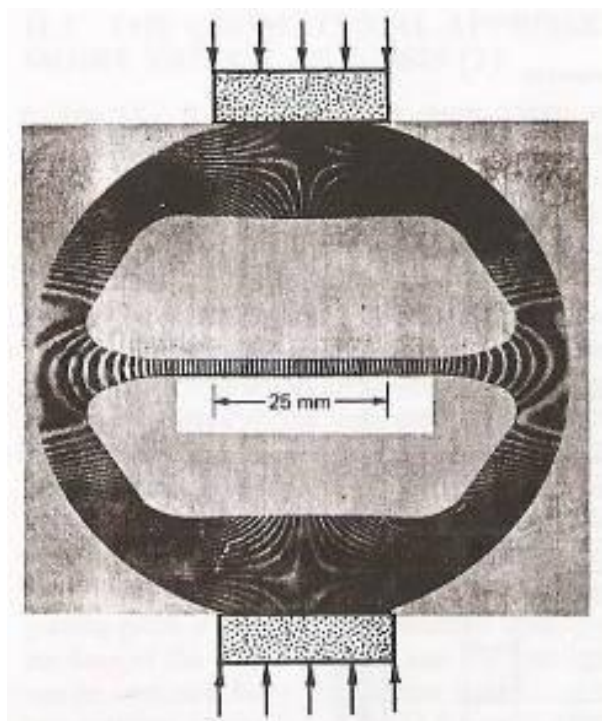
É interessante observar que o comprimento de referência de 25 mm representa o comprimento final ou deformado, maior do que o original.

Por definição a deformação é a variação de comprimento dividida pelo comprimento original:

$$\varepsilon = u/l_0 = 0,8/(25 - 0,8) = 0,033$$

⁷ Convém lembrar que as resistências características do concreto convencional variam na faixa de $50 \text{ MPa} \geq f_{ck} \geq 20 \text{ MPa}$ e portanto, pode-se considerar, para efeito de simples comparação, $E_{\text{médio}} = 5600\sqrt{25} = 28000 \text{ MPa}$; (NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto-Procedimento, 2003).

Na maioria dos problemas de interesse em engenharia, os campos de deformações não são uniformes, e a deformação máxima limita a máxima carga que pode ser aplicada. Por isto, normalmente o número de franjas será consideravelmente menor do que o máximo possível para o material.



**Figura 2.22-Padrão de franjas *moiré* em um corpo-de-prova especial.
Medição do alongamento horizontal da barra central tracionada.**
Fonte: (DURELLI e PARKS, 1970)

2.4.6.1 - Análise Geométrica

2.4.6.1.1 - Análise Geométrica para Grandes Deformações e Rotações

Segundo Phillips (2001), as deformações estão associadas com os gradientes dos deslocamentos, e serão determinadas pela diferenciação dos números de franjas com respeito à sua posição.

Para retículos de períodos muito espaçados, são necessários grandes deslocamentos para haver a geração franjas. Caso contrário, se estes deslocamentos forem pequenos, não serão geradas franjas em quantidade suficiente para fazer a referida diferenciação.

Por enquanto, aqui só serão consideradas as grandes deformações e rotações.

Sejam vistos novamente os exemplos simples da Figura 2.20 e Figura 2.21. Observe-se primeiro que na Figura 2.20 a franja $N = +1$ está posicionada onde o deslocamento relativo u é igual a $+1/g$. Por definição, a deformação normal na direção x , no ponto considerado, é a variação de comprimento $+1/g$ dividida pelo comprimento inicial do elemento de linha correspondente à mudança de comprimento.

O comprimento original era de 5 passos, e sofreu um aumento de 1 passo, portanto, a deformação de engenharia é $+1/5 g$ ou seja 20%.

Pela definição:

$$\varepsilon = \frac{g' - g}{g} \quad (2.13)$$

onde, g' e g são os passos dos retículos deformado e indeformado, respectivamente, e ε é a componente de deformação normal ao retículo em sua configuração original. Neste exemplo $\varepsilon = 20\%$.

Veja agora a situação em que o corpo-de-prova descarregado é rotacionado de 10° em relação ao retículo de referência (Figura 2.23). As franjas aparecem, mas estas franjas não podem estar associadas à deformação normal, porque ela não existe.

No entanto, estas franjas possuem as seguintes características:

- as franjas são quase perpendiculares à direção das linhas do retículo. Isto é, são quase paralelas à direção do deslocamento;
- as franjas fazem um ângulo ϕ com a direção x dada exatamente por:

$$\phi = \theta/2$$

onde θ é a rotação relativa dos retículos (em radianos).

- o passo G das franjas é dado aproximadamente por:

$$G = g/\theta$$

Observa-se que se $\theta = 0$ o passo da franjas $G = \infty$, e as franjas não aparecem no campo de visão. Esta situação corresponde à coincidência perfeita das linhas dos dois retículos e é chamada de “*null balance*”.

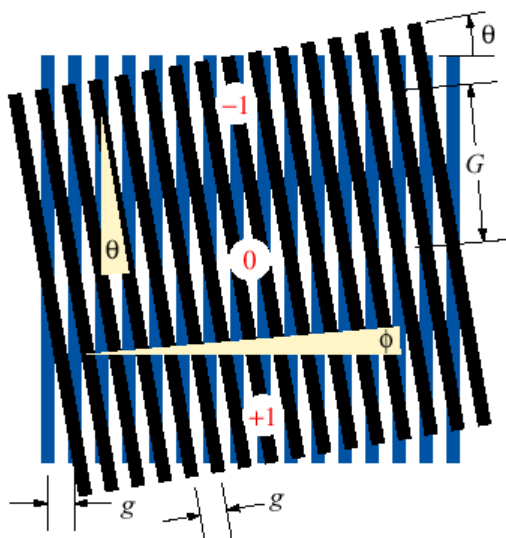


Figura 2.23 - Rotação relativa de 10° dos retículos indeformados da Figura 2.20 (campo u na direção x).
Fonte: (PHILLIPS, 2001).

Na Figura 2.24, é feita a análise para o campo v , e aplica-se raciocínio análogo ao da direção u , mostrada na Figura 2.23.

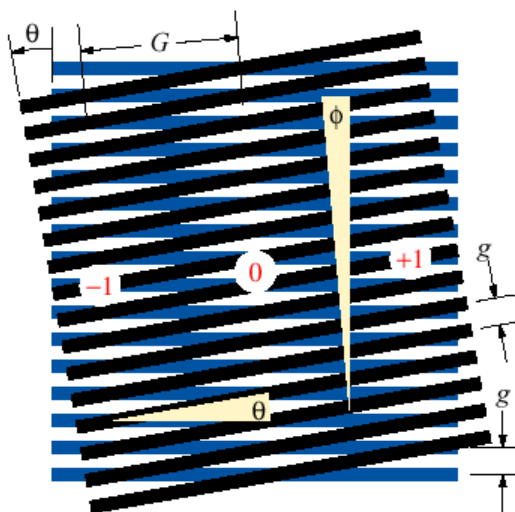


Figura 2.24 - Rotação relativa de 10° dos retículos indeformados da Figura 2.21 (campo v na direção y).
Fonte: (PHILLIPS, 2001).

Veja agora o que acontece quando grandes deformações e rotações são combinadas. Uma rotação anti-horária do modelo deformado da Figura 2.20 resulta no padrão de franjas mostradas na Figura 2.25.

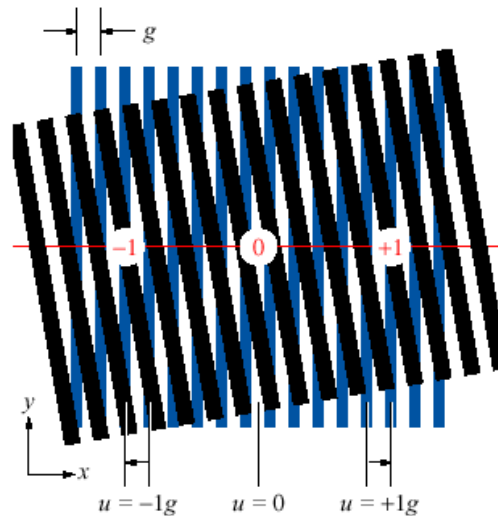


Figura 2.25 - Rotação do retículo do modelo da Figura 2.20 de 10°
Fonte: (PHILLIPS, 2001)

É óbvio que esta rotação provoca alguma confusão na interpretação da deformação normal.

Em primeiro lugar, o espaçamento das franjas ao longo do eixo x mudou. Então, a diferenciação mecânica da posição das franjas em relação à direção x não pode, por ela mesma, ser usada para calcular deformação normal nesta direção.

Um fenômeno similar é observado para o deslocamento v na direção y (Figura 2.26).

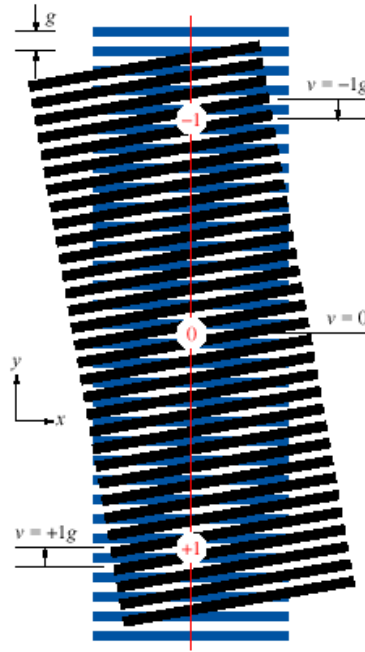


Figura 2.26 - Rotação do retículo do modelo da Figura 2.21 de 10°

Fonte: (PHILLIPS, 2001)

Felizmente, uma simples análise da geometria dos padrões de franjas da Figura 2.27 revela o mecanismo do comportamento das componentes das grandes deformações e rotações, conforme mostrado a seguir.

O passo g do retículo de referência é presumido conhecido. Pode-se medir o espaçamento das franjas δ e o seu ângulo ϕ .

O elemento de linha AB tem os comprimentos equivalentes:

$$\frac{g'}{\cos(\phi - \theta)} = \frac{g}{\cos \phi} \quad (2.14)$$

onde, g' é o passo desconhecido do retículo deformado, e θ é o ângulo de rotação desconhecido do mesmo retículo.

Vê-se também que o elemento AC tem os comprimentos equivalentes:

$$\frac{g}{\sin \theta} = \frac{\delta}{\cos(\phi - \theta)} \quad (2.15)$$

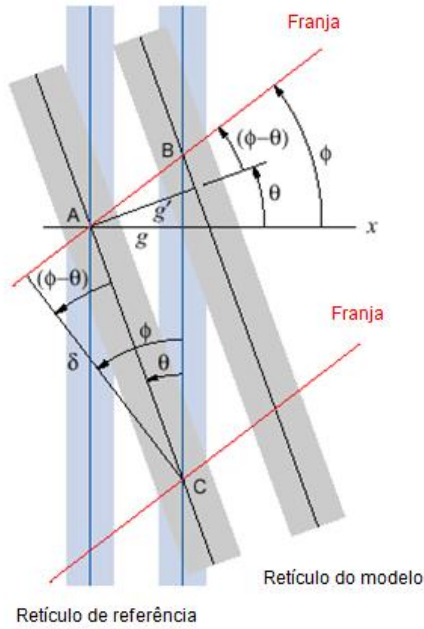


Figura 2.27 – Geometria da deformação dos retículos para grandes deformações e rotações.
Fonte: Phillips (2001)

Nesta equação, θ é a única incógnita. Em princípio, ela pode ser determinada resolvendo-se a seguinte equação:

$$\cos(\phi - \theta) - \left(\delta/g\right)\sin\theta = 0$$

Com θ conhecido, pode-se agora calcular a deformação normal ε de um dos dois modos equivalentes.

Das Equações 2.13 e 2.14:

$$\varepsilon = \frac{g'}{g} - 1 = [\cos(\phi - \theta) / \cos\phi] - 1 \quad (2.16)$$

e da Equação 2.15, pode-se reescrever:

$$\varepsilon = (\delta \sin\theta / g \cos\phi) - 1 \quad (2.17)$$

Exemplo

Seja considerado o padrão da Figura 2.26. O passo g do retículo de referência é conhecido. Pode-se medir o espaçamento das franjas δ e o seu ângulo ϕ .

$$\delta = 14,1 \text{ unidades}$$

$$g = 3,33 \text{ unidades}$$

$$\phi = 50,6^\circ$$

Por tentativa e erro, encontra-se da Equação 2.15 que $\theta = 10,4^\circ$ (a resposta correta é 10°). Da Equação 2.16 com $\theta = 10,4^\circ$, encontra-se:

$$\varepsilon = [\cos(\phi - \theta) / \cos\phi] - 1 = [\cos(50,6 - 10,4) / \cos 50,6] - 1 = 0,203$$

(A resposta correta é 0,2).

Este método vale para o caso geral das grandes deformações e rotações.

2.4.6.1.2 - Análise Geométrica para Pequenas Deformações e Rotações

A seguir, serão considerados os casos limites das deformações e rotações tendendo a zero, que podem dificultar a análise numérica devido a pequenas diferenças entre números de grandezas equivalentes, tais como na equação 2.16.

Caso limite: a deformação tende a zero

No limite $\varepsilon \rightarrow 0$; da equação 2.16:

$$\cos(\phi - \theta) = \cos\phi \quad (2.18)$$

Da equação 2.17, lembrando-se que $\phi - \theta = 2\phi$;

$$\delta = \frac{g \cos\phi}{\sin\theta} = \frac{g \cos(\theta/2)}{\sin\theta} \quad (2.19)$$

Caso limite: a rotação tende a zero

No limite $\theta \rightarrow 0$, é preciso tomar cuidado na avaliação de certos termos. Em primeiro lugar, seja considerado o caso onde $\varepsilon > 0$. Analisando a Equação 2.16, percebe-se que o único modo do termo $\frac{\cos(\phi-\theta)}{\cos\phi} \neq 1$ quando $\theta \rightarrow 0$, para não anular a deformação, é quando $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$. Aliás, é

o que acontece, pois quando a rotação $\theta \rightarrow 0$, as franjas de *moiré* tornam-se paralelas ao retículo de referência.

Considerando este comportamento, podem-se fazer as seguintes aproximações:

$$\begin{aligned}\cos(\phi - \theta) &= \sin\left[\frac{\pi}{2} - (\phi - \theta)\right] \cong \frac{\pi}{2} - (\phi - \theta) \\ \cos\phi &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cong \frac{\pi}{2} - \phi\end{aligned}$$

Substituindo-se na equação 2.16:

$$\varepsilon \rightarrow \frac{\frac{\pi}{2} - (\phi - \theta)}{\frac{\pi}{2} - \phi} - 1 = \frac{\theta}{\frac{\pi}{2} - \phi}$$

isto é,

$$\begin{aligned}\phi &= \pi/2 - \theta/\varepsilon \\ \text{quando } \theta \rightarrow 0 \quad \phi &\rightarrow \pi/2\end{aligned}\tag{2.20}$$

A equação 2.17 pode agora ser utilizada para calcular a deformação em termos do espaçamento δ das franjas. De acordo com o limitante de comportamento que se acaba de observar:

$$\begin{aligned}\sin\theta &\cong \theta \\ \cos\phi &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cong \pi/2 - \phi = \theta/\varepsilon\end{aligned}$$

e então a equação 2.17 torna-se:

$$\varepsilon = (\delta \sin\theta / g \cos\phi) - 1 = [\delta \theta / g(\theta/\varepsilon)] - 1$$

Resultando na expressão:

$$\varepsilon = \frac{g}{\delta - g} \quad (2.21)$$

Esta equação vale para $\varepsilon > 0$ (alongamento por tração).

Observa-se então que ela segue corretamente a definição de deformação por tração: dado pela variação de comprimento g do elemento linear que era originalmente de comprimento $(\delta - g)$.

Expressões similares a Equações 2.20 e 2.21 podem ser deduzidas para o caso de $\varepsilon < 0$ (encurtamento por compressão).

A única diferença é que $\phi \rightarrow -\pi/2$ quando $\theta \rightarrow 0$.

Seguindo o mesmo princípio, a equação 2.20 fica:

$$\phi \rightarrow -\pi/2 - \theta/\varepsilon \quad \text{quando } \theta \rightarrow 0 \quad (2.22)$$

e a equação 2.21 fica:

$$\varepsilon = \frac{-g}{\delta + g} \quad (2.23)$$

Novamente, pode-se observar que isto obedece corretamente à definição de deformação de encurtamento por compressão: variação do comprimento de $-g$, para uma linha que originalmente tinha um comprimento $(\delta + g)$.

2.4.6.1.3 - Análise Geométrica Simplificada para Pequenas Deformações e Rotações

Segundo Spots (2005), uma simplificação numérica adicional pode ser feita, considerando-se que o passo g do retículo é geralmente muito menor do que a distância δ entre as franjas.

A partir das equações 2.21 e 2.23:

$$\varepsilon = \pm \frac{\delta g}{\delta} \quad (2.24)$$

este cálculo geométrico aproximado assume valores iguais tanto para tração como para compressão.

2.4.6.2 - Análise para Pequenas Deformações e Rotações a Partir de Campo de Deslocamentos Numéricos

Quando a densidade do retículo é alta o suficiente, até mesmo pequenas trações e rotações produzem múltiplas franjas.

Retículos mecânicos com 40 a 80 linhas/mm, dispostas em modelos de tamanho usual, caem normalmente neste caso.

Também é o caso de modelos pequenos e até mesmo microscópicos quando investigados através de interferômetros com retículos corrugados de 2000 a 4000 linhas/mm.

Se os deslocamentos e os gradientes de deslocamento são pequenos, então as relações entre deformações e deslocamento tornam-se:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial(gN_x)}{\partial x} \cong g \frac{\Delta N_x}{\Delta x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial(gN_y)}{\partial y} \cong g \frac{\Delta N_y}{\Delta y} \\ \tau_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial(gN_y)}{\partial x} + \frac{\partial(gN_x)}{\partial y} \cong g \left(\frac{\Delta N_y}{\Delta x} + \frac{\Delta N_x}{\Delta y} \right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Embora as pequenas rotações gerem franjas de *moiré* inclinadas, neste caso de muitas franjas, a inclinação não afeta a distância entre as franjas na direção normal ao retículo e este é o dado necessário para se calcular a tração normal para ε_x e ε_y . Em particular, apenas o campo padrão u é

necessário para determinar a distribuição para ε_x e apenas o campo padrão v é necessário para determinar a distribuição para ε_y .

A deformação de cisalhamento γ_{xy} , porém, depende de derivadas mistas de N_x e N_y , as quais são dependentes do espaçamento das franjas na direção paralela aos respectivos retículos.

Estes espaçamentos são extremamente sensíveis até mesmo às pequenas rotações.

Se estes padrões de franjas de *moiré* forem obtidos em experimentos distintos, então se deve tomar extremo cuidado, tanto impedindo a rotação da linha selecionada do elemento em cada retículo deformado em relação à linha correspondente selecionada no retículo de referência, como tirando medidas destas rotações de maneira rigorosamente precisa, com a finalidade de compensá-los durante a análise dos dados.

Um procedimento alternativo é utilizar retículos cruzados a 90° para gravar o deslocamento tanto do campo u quanto do campo v na mesma imagem. Este procedimento será tanto mais efetivo quanto os padrões do campo u e campo v puderem ser distinguidos isoladamente.

Esta é uma formulação clássica da técnica de *moiré* geométrico e pode ser encontrada em trabalhos de vários autores entre os quais se pode citar (NISHIJIMA, 1964), (OSTER e NISHIJIMA, 1964), (CLOUD, 1998).

São considerados como pequenas rotações ângulos $\theta < 3^\circ$ (POST, IFJU E HAN, 1994).

Quando os retículos não têm rotação relativa entre si, o aspecto das franjas geradas é idêntico, quer em alongamento ou encurtamento (Figura 2.28 a).



Figura 2.28 (a) Retículos sem rotação entre si: franjas paralelas iguais horizontais para encurtamento (esquerda) e alongamento (direita).

Fonte: o autor



Figura 2.28 (b) Retículos com rotação entre si: franjas paralelas inclinadas com direções inversas para encurtamento (esquerda) e alongamento (direita).

Fonte: o autor

Wolfe et al.(1994) afirmaram que as pequenas rotações entre os retículos permitem diferenciar quando o deslocamento é de alongamento ou de encurtamento, porque as franjas produzidas têm os seus ângulos diferenciados. Este fenômeno é melhor entendido observando-se a Figura 2.28 b.

O estado completo de tensões pode ser obtido a partir das deformações, utilizando as relações tensão-deformação fornecidas pelas equações constitutivas do material do corpo-de-prova (HAN et al., 2008).

2.4.6.3 - Análise para Pequenas Deformações e Rotações a Partir do Campo de Deslocamentos em Imagens Digitais

Segundo Spots (2005), para o caso do campo dos deslocamentos serem fornecidos por imagens digitais, as equações (2.25), para cálculo das deformações no plano, apresentadas anteriormente, tomam a forma:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+n} - u_{i-n}}{2n\Delta x'} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{v_{i+n} - v_{i-n}}{2n\Delta y'} \\ \tau_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{v_{i+n} - v_{i-n}}{2n\Delta x'} + \frac{u_{i+n} - u_{i-n}}{2n\Delta y'}\end{aligned}\tag{2.26}$$

onde:

$$\Delta x' = \left(\frac{1}{\beta_x}\right)\Delta x \quad \text{e} \quad \Delta y' = \left(\frac{1}{\beta_y}\right)\Delta y;$$

β_x e β_y = fatores de multiplicação/ampliação do sistema de imagem;

Δx , Δy = distância entre pixels vizinhos no plano da matriz CCD;

$2n$ = número de pixels sobre o qual é feita a diferenciação.

2.4.7 - O Aumento de Sensibilidade das Técnicas de *Moiré*

Segundo Lino (2002), a sensibilidade das TM pode ser aumentada através de vários métodos, tais como interpolação de franjas, multiplicação de franjas e técnicas de retículos desencontrados (*mismatch* techniques). Foram incluídos os dois métodos mais importantes, sendo o primeiro utilizado nos experimentos que serão apresentados no decorrer deste trabalho.

2.4.7.1 – O Método da Multiplicação Óptico-Digital de Franjas (ODFM)

Segundo Post, Ifju e Han (1994), o método de multiplicação óptico-digital de franjas é um método muito robusto, produz um maior número de franjas de *moiré* e contorna as dificuldades causadas pela variação da intensidade da iluminação ao longo do objeto em estudo, principalmente na TM de sombra, mas também pode ser usado na TM geométrico para medições no plano.

Segundo os autores, devido à complexidade matemática de distribuição de intensidades a demonstração matemática pode ser feita, simplificada, para o caso geral da distribuição periódica de intensidades mostrada a seguir:

Seja a intensidade luminosa da interferência de dois feixes luminosos A e B:

$$I_{(x,y)} = I_{A(x,y)} + I_{B(x,y)} + 2\sqrt{I_{A(x,y)}I_{B(x,y)}}\cos[\theta_{(x,y)}] \quad (2.27)$$

onde a fase $\theta_{(x,y)}$ representa a ordem de franja N em cada ponto por:

$$\theta_{(x,y)} = 2\pi N_{(x,y)} \quad (2.28)$$

Os termos I_A e I_B são funções de x,y porque a intensidades dos feixes de luz não são constantes a através do campo.

Para uma série de β deslocamentos do retículo de referência, a fase de cada padrão de moiré é também deslocada de $\frac{2\pi}{\beta}$, em relação à sua posição inicial. Um termo adicional de fase é adicionado a $\theta_{(x,y)}$, a cada deslocamento. Uma vez que β é sempre um inteiro, os padrões podem

ser divididos em dois grupos: os padrões da primeira metade e seus complementos. Estas distribuições de intensidades são:

$$\begin{aligned}
I_{i(x,y)} &= I_{A(x,y)} + I_{B(x,y)} + 2\sqrt{I_{A(x,y)}I_{B(x,y)}}\cos\left[\theta_{(x,y)} + \frac{2i\pi}{\beta}\right] \\
I_{i^\pi(x,y)} &= I_{A(x,y)} + I_{B(x,y)} + 2\sqrt{I_{A(x,y)}I_{B(x,y)}}\cos\left[\theta_{(x,y)} + \frac{2i\pi}{\beta}\right] \\
i &= 0, 1, 2, \dots, \frac{\beta}{2} - 1
\end{aligned} \tag{2.29}$$

onde, I_i é a distribuição de intensidades para o $i^{\text{ésimo}}$ padrão deslocado, que foi deslocado de $\frac{2i\pi}{\beta}$ com respeito ao padrão original. I_i^π é a distribuição de intensidades do correspondente padrão complementar, que é deslocado de π , com respeito ao $i^{\text{ésimo}}$ padrão.

Quando estas distribuições de intensidades são capturadas pela câmera de vídeo e as intensidades em cada pixel são convertidas para um valor digital, sobre uma escala de 256 tons de cinza, estes valores podem ser subtraídos para fornecer a distribuição de intensidade resultante a seguir:

$$I_{r(x,y)} = I_{i(x,y)} - I_{i^\pi(x,y)} = 4\sqrt{I_{A(x,y)}I_{B(x,y)}}\cos\left[\theta_{(x,y)} + \frac{2i\pi}{\beta}\right] \tag{2.30}$$

que, mostra que a intensidade resultante é uma cosenóide modulada por um termo que contém as distribuições de intensidades dos dois feixes luminosos originais. Nos pontos em que a fase satisfaz à condição $\cos\left[\theta_{(x,y)} + \frac{2i\pi}{\beta}\right] = 0$, a fase fica livre dos ruídos sistemáticos presentes em I_A e I_B . Esses valores são:

$$\theta_{(x,y)} = \pi\left(\frac{2m+1}{2} - \frac{2i}{\beta}\right) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \tag{2.31}$$

portanto, $I_{r(x,y)} = 0$ para cada ponto onde, da equação (2.28):

$$N_{(x,y)} = \left(\frac{2m+1}{4} - \frac{i}{\beta}\right) \tag{2.32}$$

Estas ordens de franja correspondem aos pontos quartenarios mostrados na Figura 2.29.

Existe uma característica especial no processo de subtração quando o contorno das franjas coincide com as ordens que formam múltiplos de um quarto de franja ($N = 1/4, 3/4, 5/4$), que correspondem aos chamados pontos quartenários (*quarters points*). Nestes pontos, as intensidades do padrão complementar *moiré* variam mais rapidamente com a ordem da franja, que é definida com mais exatidão por ser representada por um nível cinza de vídeo. Por outro lado, quando está próximo das intensidades máximas e mínimas, cada nível de cinza representa o incremento mais amplo possível de ordem de franja, e por isto, o nível de franja é definido com menos exatidão. Devido a este fato, os pontos quartenários (*quarters points*) são locados com a mais alta fidelidade.

O método O/DFM, passo a passo, pode ser acompanhado nas sequências da Figura 2.29 [(a) a (d)], e da Figura 2.30 [(a) a (e)]:

- este método consiste em obter duas imagens das franjas de *moiré* (Figura 2.30a). Nela, as franjas de *moiré* estão defasadas uma da outra de π , ou seja, meio período da franja de *moiré*, de maneira que, em uma imagem, no local onde existe uma franja clara, na outra existirá uma franja escura, isto é, uma imagem é inversa da outra;
- subtrai-se uma imagem da outra e calcula-se o seu módulo, obtendo-se uma imagem com o dobro de franjas de *moiré* (Figura 2.30c);
- transforma-se a imagem em binário, atribuindo-se 0 (zero) à intensidade luminosa com valores próximos de 0 (escuro) e 255 (por exemplo) para os demais valores (Figura 2.30d), proporcionando o refinamento das franjas de *moiré*, o que facilita a sua digitalização, além de eliminar qualquer tipo de ruído.

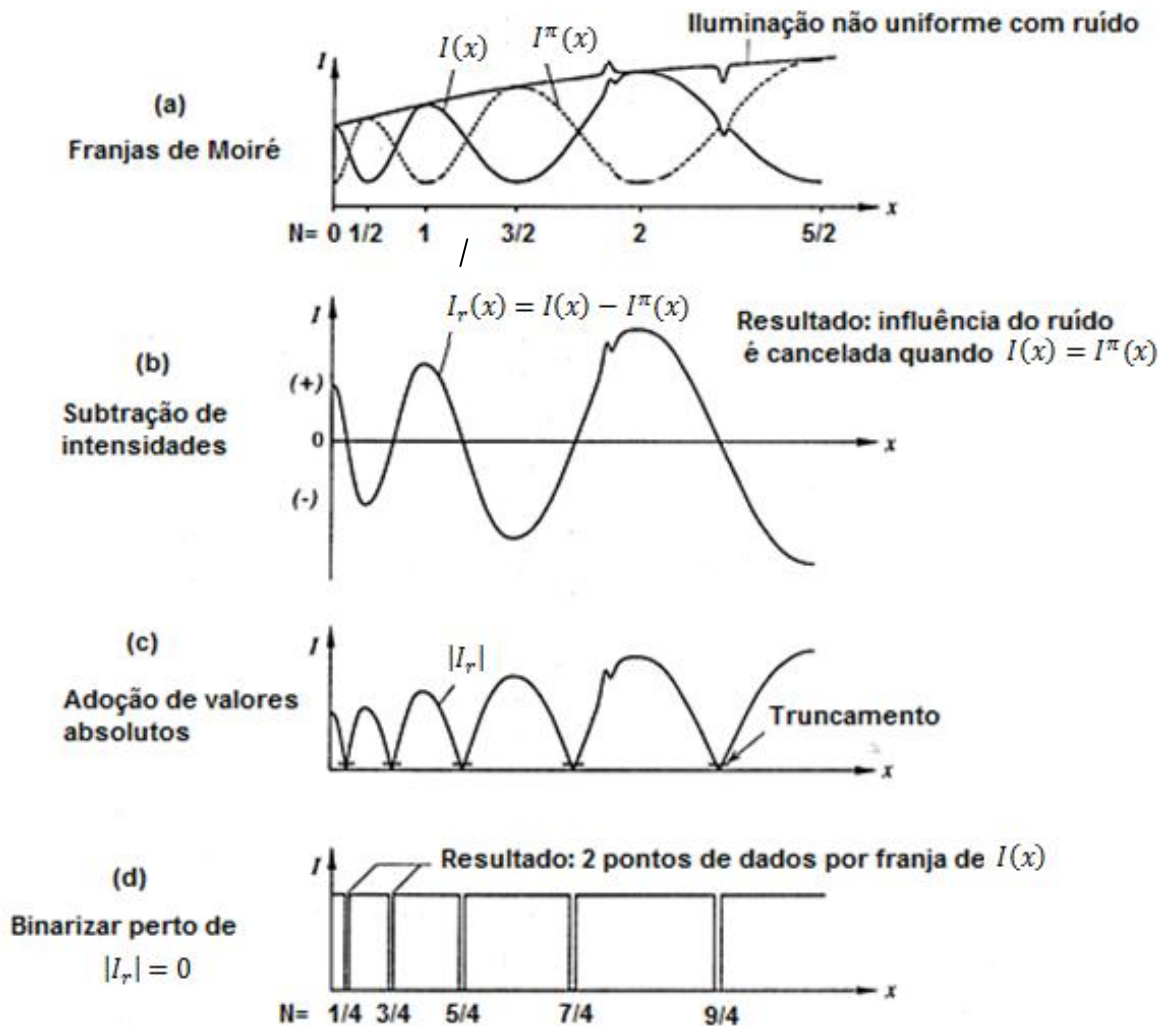


Figura 2.29 - Método O/DFM, estágios do processo de refinamento de franjas.
Fonte: (POST, IFJU e HAN,1994).

As equações para cálculo dos campos de deslocamentos são:

$$u = \frac{g}{\beta} N_x \quad (2.33)$$

$$v = \frac{g}{\beta} N_y \quad (2.34)$$

onde:

g = período do retículo;

N = ordem de franja com referência arbitrária;

β = fator de multiplicação das franjas;

(u, v) = campos de deslocamento em x e y , respectivamente.

Os interferogramas fornecem os dados para o método da O/DFM. Ele é executado pelo movimento do retículo de referência nas direções x e y para incrementar u e v uniformemente em todo o campo. N é incrementado de uma ordem de franja quando u e v são incrementados por g . Assim, os dados experimentais são compostos por β padrões de franja registrados após g/β sucessivos deslocamentos do retículo de referência. Para cada padrão sucessivo o correspondente deslocamento de fase é $2\pi/\beta$.

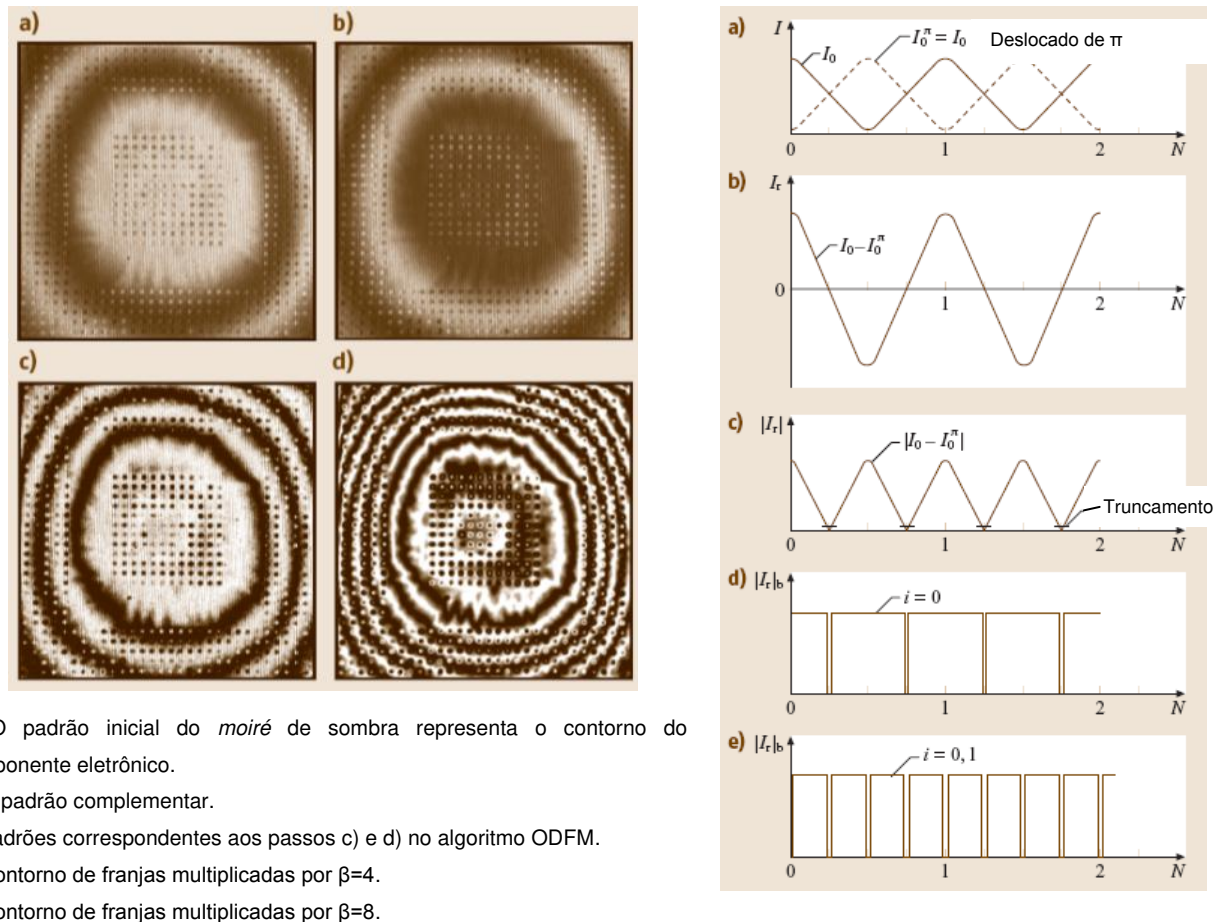


Figura 2.29-. Passos no algoritmo O/DFM, aplicados com distribuição quase-triangular do *moiré* de sombra.
Fonte (HAN et al., 2008).

O método de O/DFM foi aplicado no ensaio descrito na Figura 2.31 e foram obtidos os resultados mostrados nas Figuras 2.32, 2.33 e 2.34 (POST, IFJU e HAN, 1994).

É oportuno observar que no exemplo da Figura 2.31, a sensibilidade de medição após a multiplicação de franjas, teve um aumento de 10 vezes (de 0,05 mm para 0,005 mm) o que equipara-se à sensibilidade de medição de um retículo de 200 linhas por mm.

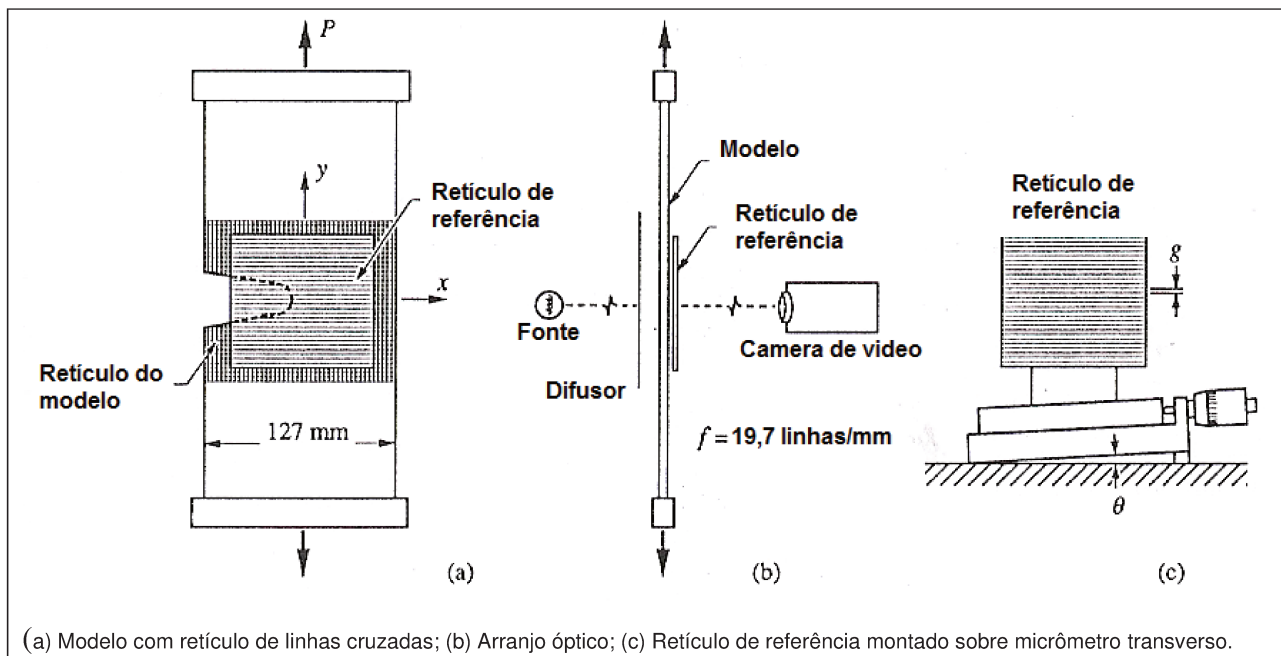


Figura 2.31 - Arranjo experimental.

Fonte: (POST, IFJU e HAN, 1994).

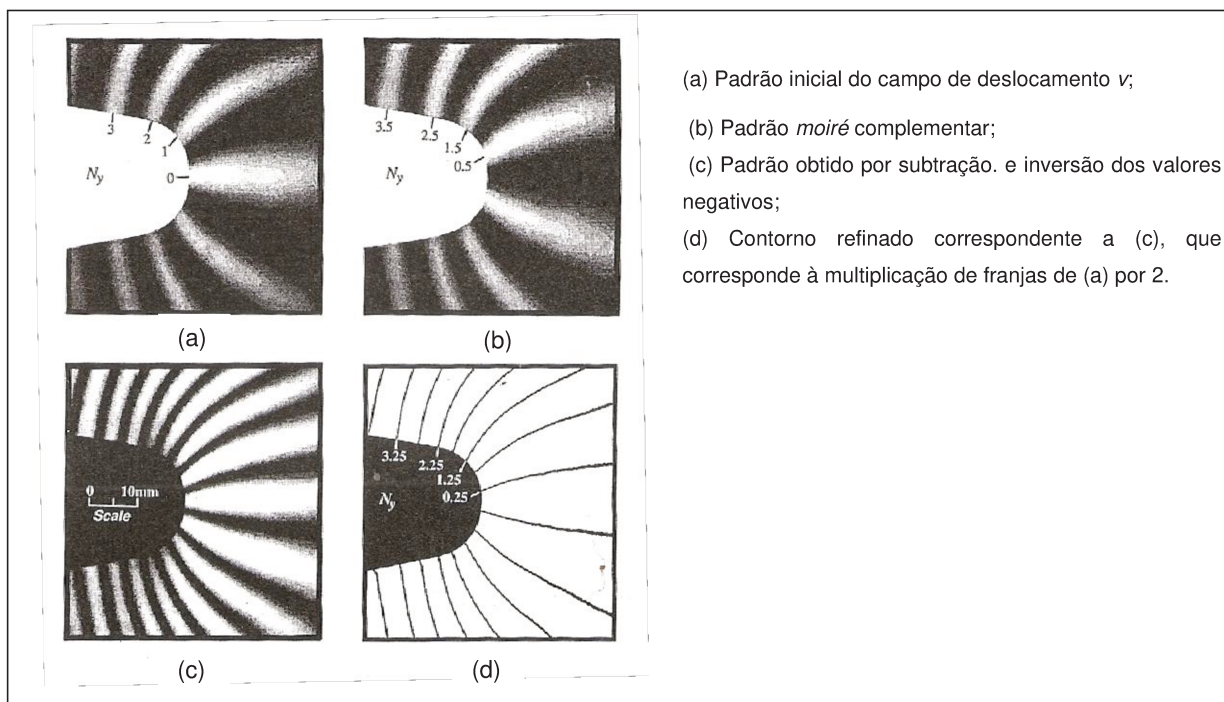


Figura 2.32- Mecanismo básico de multiplicação de franjas pelo método O/DFM para o *moiré* geométrico para medição de deslocamentos no plano. Fonte: (POST, IFJU e HAN, 1994).

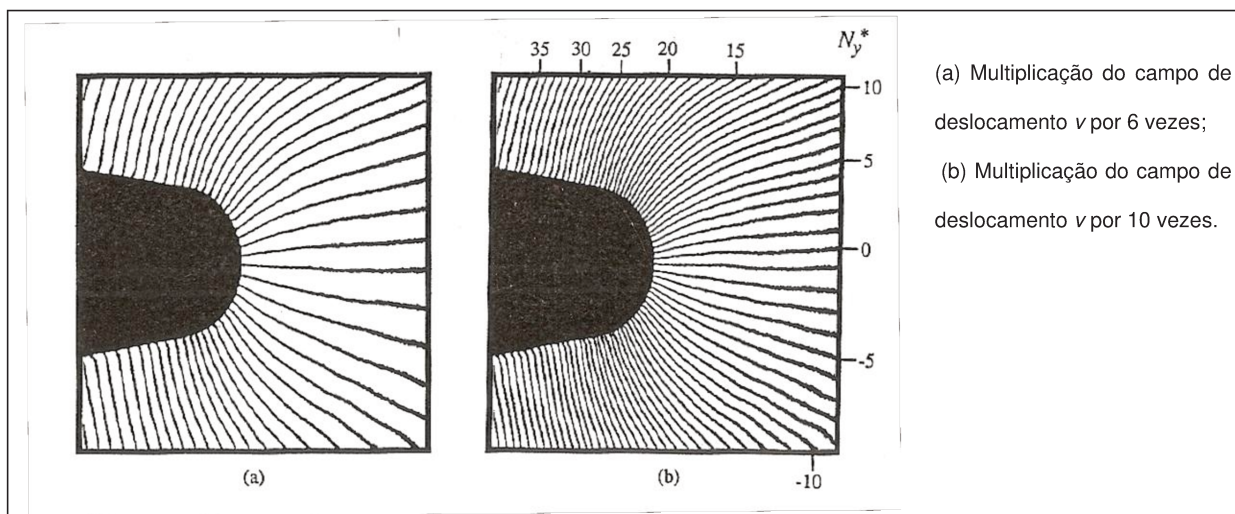


Figura 2.33-Multiplicação de franjas pelo método O/DFM para o *moiré* geométrico para medição de deslocamentos no campo v por 6 e por 10 vezes.

Fonte: (POST, IFJU e HAN,1994).

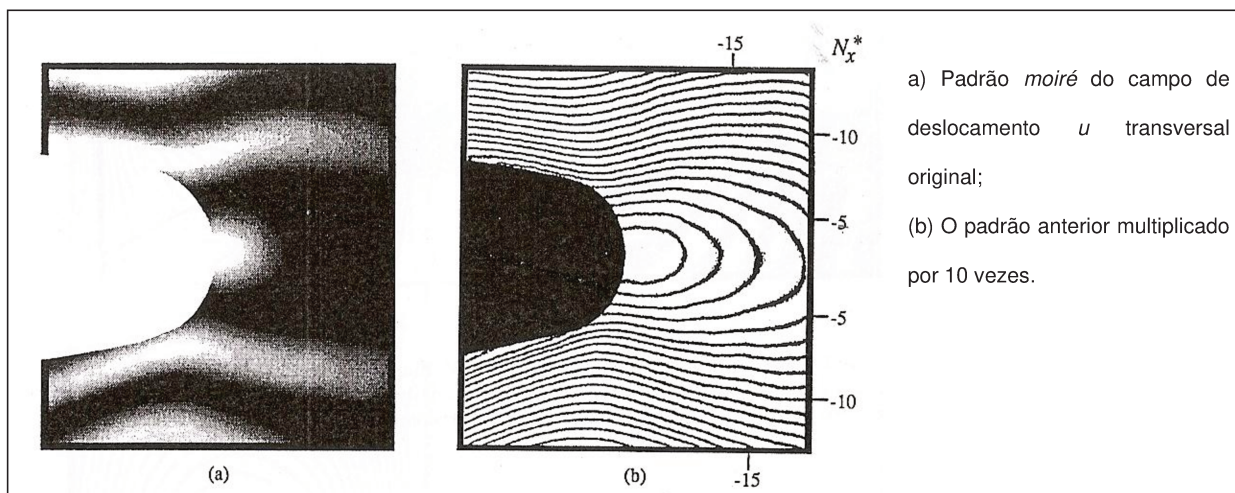


Figura 2.34-Multiplicação de franjas pelo método O/DFM para o *moiré* geométrico para medição de deslocamentos no campo u por 10 vezes.

Fonte: (POST, IFJU e HAN,1994).

Outro experimento de aplicação equivalente do método O/DFM para a TM de sombra, comprova que a sensibilidade do método é efetivamente aumentada e é apresentado a seguir.

Um perfil C de alumínio foi submetido a uma carga de compressão, com o objetivo de medir, pela TM de sombra os deslocamentos na direção z (fora do plano). Os resultados são mostrados na Figura 2.35. Observa-se que somente no padrão de franjas obtido após a multiplicação de franjas por O/DFM por 6, mostrado na Figura 2.35(b), é possível notar um ressalto na borda do furo que não era perceptível no padrão original da Figura 2.35(a).

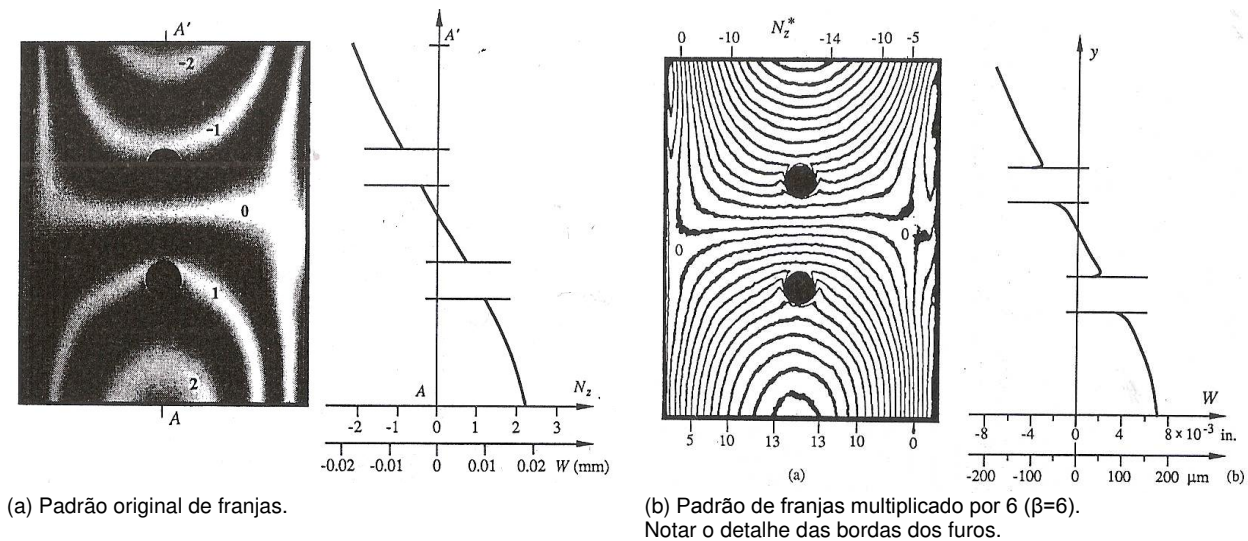


Figura 2.35 - Aumento de sensibilidade efetivo.

Fonte: (POST, IFJU e HAN, 1994).

Este experimento mostra que o aumento de sensibilidade do método O/DFM é real, e que é esta capacidade que possibilitou a detecção mais apurada das nuances do campo de deslocamentos na Figura 2.35.

2.4.7.2 - O Método do Deslocamento de Fase (ou Quase-Heterodino)

Su e Chen (2001) citam que o método de deslocamento de fase é utilizado por várias técnicas ópticas: perfilometria por medição de fase (PMF), perfilometria por transformada de Fourier (PTF), perfilometria por medição de modulação (PMM), detecção espacial de fase (DEF), projeção de franjas de cores codificadas (PFCC).

Dirkx e Decraemer (1990), Dirkx, Decraemer e Dielis (1988), aplicaram o método de deslocamento de fase à TM de sombra, obtendo uma resolução, na prática, no mínimo 10 vezes maior que a simples medição de franjas para um dado arranjo experimental. Além disso, é mais rápido e é capaz de determinar automaticamente a concavidade e a convexidade da superfície.

Wang e Hassell (2000) descreveram o método de deslocamento de fase aplicado à TM de Sombra e dizem que são necessárias 4 imagens das franjas de *moiré*. Em cada uma delas o objeto é aproximado ou afastado do retículo de referência de maneira a produzir deslocamentos das franjas de *moiré* $1/2\pi$, 1π e $3/2\pi$ de fase. (Figura 2.36).

A intensidade luminosa em cada uma das imagens é descrita pelas equações:

$$I_1(x, y) = a(x, y) - b(x, y)\cos\phi(x, y) \quad (2.35)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) - b(x, y)\cos\left[\frac{\pi}{2} + \phi(x, y)\right] \quad (2.36)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) - b(x, y)\cos[\pi + \phi(x, y)] \quad (2.37)$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) - b(x, y)\cos\left[\frac{3\pi}{2} + \phi(x, y)\right] \quad (2.38)$$

onde:

$a(x, y)$ = intensidade luminosa do fundo em cada ponto da imagem;

$b(x, y)$ = intensidade de modulação em cada ponto da imagem;

$\cos\phi$ = fase a ser determinada.

Resolvendo as 4 equações simultaneamente, pode-se obter o termo fase ($\cos\phi$) para cada ponto da imagem:

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right] \quad (2.39)$$

O cálculo da fase feito pelo computador resulta em valores que variam de $-\pi$ a π ; por isso a imagem resultante, que é chamada de mapa de fases empacotadas, possui descontinuidades. A Figura 2.36 mostra as 4 imagens da placa de circuito impresso, com as franjas de fases deslocadas de 0, $1/2\pi$, π e $3/2\pi$.

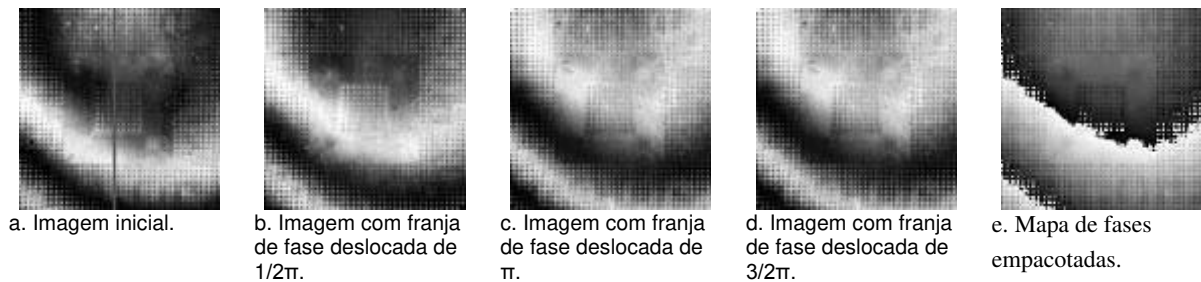


Figura 2.36: Método de deslocamento de fase.

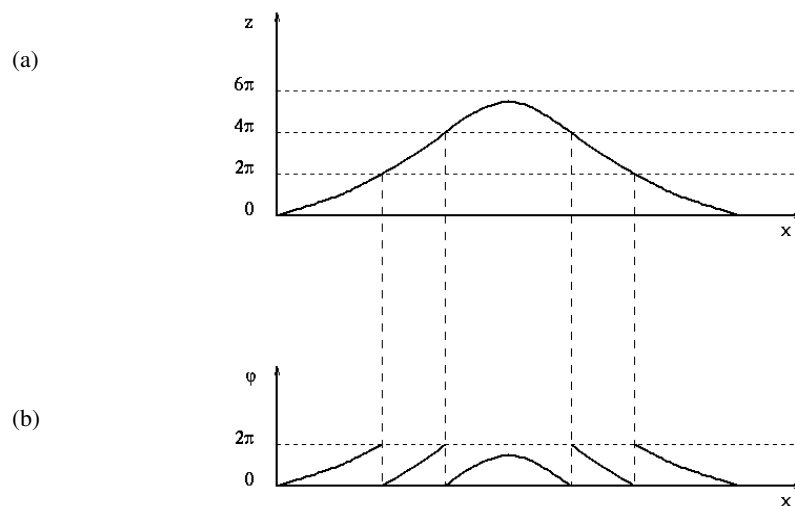
Fonte: (WANG e HASSELL, 2000)

Estas descontinuidades são removidas por um processo chamado desempacotamento de fase (*Phase unwrapping*). A Figura 2.37 mostra o perfil de um objeto com mapa de fases empacotadas (a) e o mesmo perfil com as fases desempacotadas (b).

Soille (2000) afirmou que o processo de desempacotamento de fase não é um processo trivial, pois pode apresentar erros devido a:

- ruídos eletrônicos e *speckle*;
- presença de formas arbitrárias como furos, cantos, etc;
- regiões com baixa modulação;
- mudanças de fase abruptas, devido a descontinuidades maiores que π .

A Figura 2.38 mostra os resultados do algoritmo de deslocamento de fase para uma aplicação de *moiré* de sombra em componentes eletrônicos.



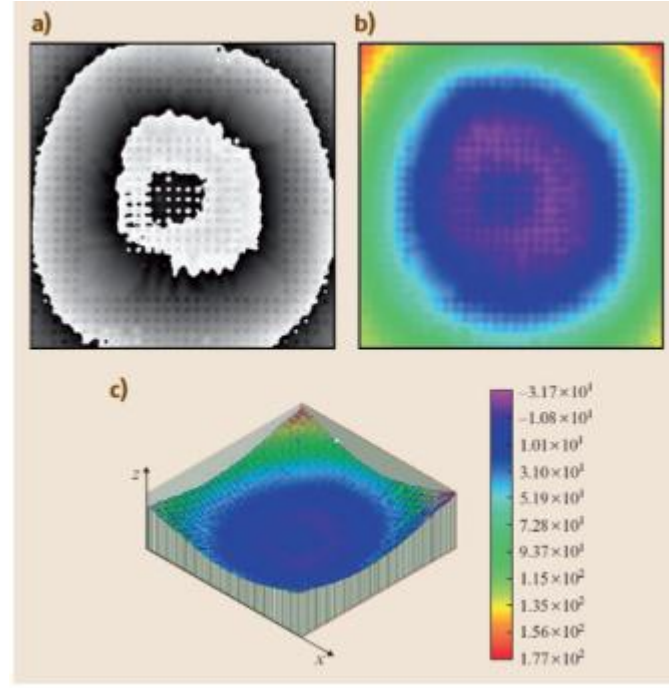
(a) Mapa de Fases empacotadas de um perfil; (b) Fases desempacotadas do mesmo perfil.

Figura 2.37: Desempacotamento de fases.

Fonte: (SOILLE, 2000).

Segundo SPOTS (2005), a análise digital de deslocamento de fase não fica restrita à localização das franjas no espaço, como acontece com o método geométrico (ou manual), de análise mostrado em 2.4.6.1, mas ela é capaz de detectar deslocamentos em cada ponto individualmente. Por exemplo, quando é utilizado um retículo com passo $g = 0,025$ mm (40 linhas/mm), considerando que a distância entre as franjas $\delta = 25$ mm dentro do campo de vista, pelo método simplificado a deformação máxima mensurável é:

$$\varepsilon_x = \frac{g}{\delta} = 1000 \mu$$



(a) mapa de fases empacotadas; (b) mapa de fases desempacotadas; (c) Mapa de deslocamentos em 3D.

Figura 2.38-Resultados do algoritmo deslocamento de fase em outra aplicação de *moiré* de sombra em componentes eletrônicos.

Fonte: (HAN, et al., 2008).

Entretanto, se uma análise digital por deslocamento de fase for aplicada para determinar o deslocamento no plano não será necessário haver franjas de *moiré* no campo de visão, e é possível determinar deslocamentos que correspondem, por exemplo, a um vigésimo daquele obtido diretamente do espaçamento da franja de *moiré*.

Neste caso, a deformação máxima mensurável é:

$$\varepsilon_x = \frac{g}{20\delta} = 50\mu$$

Houve, portanto, um aumento expressivo de sensibilidade. Desta forma, a sensibilidade é diretamente relacionada com a capacidade do sistema de medição de detectar deslocamentos no plano dentro do campo de visão.

2.4.7.3 - Vantagens e Desvantagens dos Métodos de Aumento de Sensibilidade das Técnicas de *Moiré*

O método quase-heterodino, ou do deslocamento de fase, é bem conhecido e é usualmente utilizado para análise computadorizada de franjas em interferogramas (SPOTS, 2005).

Ele foi desenvolvido antes do método da multiplicação óptico-digital de franjas (O/DFM). O propósito de ambos é melhorar a resolução e exatidão da extração de dados dos interferogramas, e eles podem ser comparados. Existem vantagens e desvantagens em ambos.

O método quase-heterodino calcula a ordem de franja para cada pixel do campo, utilizando três ou mais interferogramas de fase deslocada.

O método O/DFM produz o mapa de contornos com intervalos discretos. Este último método é compatível com o grande intervalo da distribuição de intensidades periódicas e tolera as variações sistemáticas de intensidade introduzidas pela não linearidade do sistema de câmeras.

Com o método quase-heterodino, alguns dos dados irão cair na região de baixo gradiente de intensidade, que ocorrem perto dos pontos de mínimo ou máximo, onde a intensidade varia lentamente com as mudanças do ângulo de fase.

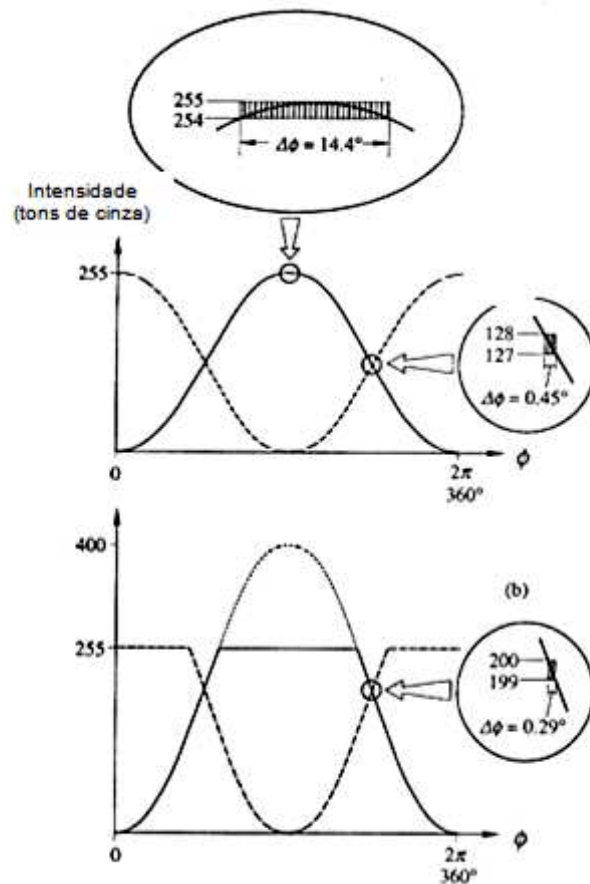
Com o método O/DFM todos os dados caem em pontos onde o gradiente de intensidades versus ordem de franja (ou fase) é maior, e isto produz maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Como pode ser visto na Figura 2.39 (a), a fase que corresponde a um nível de incremento (de 254 para 255) junto ao ponto de máximo ou mínimo de intensidade, pode ser qualquer valor no intervalo $\Delta\phi = 14,4^\circ$.

No site de dados do método O/DFM, o intervalo é $\Delta\phi = 0,45^\circ$. A relação com o anterior é de 32:1.

A ocorrência de excessiva intensidade e saturação pode ser tratada com o O/DFM, com os resultados mostrados na Figura 2.39(b). Considerando que são gravados 256 níveis de cinza, o incremento de fase perto de um ponto de cruzamento corresponde ao incremento que estaria

presente para 400 níveis de cinza. O incremento de fase por nível de cinza é reduzido para $\Delta\phi = 0,29^\circ$, que comparado a $14,4^\circ$ dá uma proporção 1:50.



- a) A escala completa de 256 níveis de cinza foi utilizada;
- b) Há superposição e truncamento causado pela câmera;

Observar que o incremento de fase por nível de cinza é menor nos pontos de cruzamento.

Figura 2.39 - Influência do site de dados para uma distribuição senoidal de intensidades.

Fonte: (POST, IFJU e HAN, 1994).

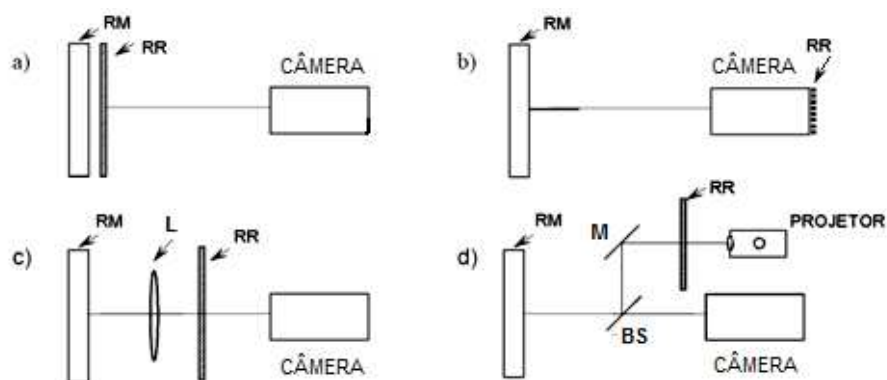
Deve-se lembrar que na prática atual o método quase-heterodino utiliza menos do que 256 níveis de cinza para prevenir saturação e não linearidades, o que significa que a relação favorável do site de dados O/DFM excede 50:1. Apesar de esta argumentação ter sido fundamentada em uma escala de 256 níveis de cinza, ela pode ser estendida para as demais escalas de cinza, observando-se o mesmo número de passos.

O método quase-*heterodino* calcula a ordem de franja (ou valor de fase) para cada pixel no campo de medição. Já o método O/DFM utiliza dados de sites selecionados para produzir mapas de contorno com intervalos discretizados. Em consequência disto, o método quase-heterodino exige um esforço computacional maior.

2.4.8 - Procedimentos e Aspectos Experimentais para a Técnica de *Moiré* Geométrico (TMG)

2.4.8.1 - Os Diversos Arranjos Experimentais para Medição de Deslocamentos no Plano pela Técnica de *Moiré* Geométrico (TMG)

As franjas de *moiré* são formadas por interferência mecânica, ao sobrepor-se dois retículos. A superposição pode ser feita diretamente (fisicamente), por meios ópticos, ou por meios fotográficos. Um requisito importante é que a superposição seja feita sem distorções ópticas; caso contrário, serão apresentadas deformações falsas (CLOUD, 1998). A seguir, será feita uma descrição sumária de várias maneiras bem sucedidas de obtenção de franjas, juntamente com algumas vantagens e desvantagens de cada uma. Ver Figura 2.40.



RR=retículo de referência, RM=retículo do modelo, L=lente, M=Espelho, BS=Espelho parcial.

Figura 2.40 - Diferentes arranjos ópticos utilizados para gerar franjas de *moiré* para medição de deslocamentos no plano: (a)superposição física; (b), (c) e (d) projeção de retículos. Fonte: (SPOTS, 2005)

2.4.8.1.1 - O Método da Sobreposição Direta

A superposição direta dos retículos de referência e do modelo é intuitivamente o método mais simples. Esse método automaticamente elimina os efeitos de distorção. Neste caso, os requisitos de resolução para o meio de gravação das franjas (câmera) não são altos, porque não é necessário capturar a imagem das linhas muito finas dos retículos.

O contraste das franjas é alto para corpos transparentes (*moiré* de transmissão). Para os corpos opacos (*moiré* de reflexão), o contraste das franjas não é tão alto.

A manutenção de um bom contato entre o retículo de referência e o do modelo é importante, e frequentemente apresenta dificuldades. Se houver um espaço entre os planos dos retículos de referência e do modelo, a visibilidade das franjas diminui. Por isto, se os retículos forem reproduzidos fotograficamente, os lados da emulsão fotográfica devem facear um ao outro.

Uma boa prática de laboratório é fixar no modelo a placa que contém o retículo de referência em só uma extremidade, usando um clip the mola leve ou até mesmo um prendedor de roupa. Os dois retículos movem-se igualmente no ponto de fixação e o campo de franjas de deslocamentos estará relacionado a esse ponto. Esta referência absoluta não é importante na análise da deformação, porque a deformação é constituída pelo gradiente das franjas de deslocamento, ou seja, da diferenciação do campo de deslocamento.

Outra boa prática de laboratório é usar algumas gotas de lubrificante, tais como óleo ou xileno, entre os dois retículos.

Como só é necessário captar a imagem das franjas já geradas em baixa resolução, os filmes de gravação instantânea servem muito bem, assim como qualquer sistema de televisão comum. Pode-se obter vídeo ao vivo ou gravação conforme desejado. Finalmente, observe que o sistema óptico para sobreposição direta de retículos (por exemplo, o das Figuras 2.40 e 2.41) é semelhante aos arranjos utilizados para fotoelasticidade de transmissão, com exceção do polarizador. Alguns praticantes usam o mesmo aparato óptico para *moiré* e fotoelasticidade.

O sistema de colimação é frequentemente constituído por uma lente de campo largo com a fonte de luz em seu foco.

Uma maneira de baratear os custos deste sistema, com menor eficiência, é substituir a lente colimadora por um difusor, que irá espalhar a luz em todas as direções.

Com este sistema, deverão ser tomados cuidados para que somente a luz com fluxo paralelo ao eixo do sistema óptico deverá ser captada pela câmera.

As lentes de campo (condensadora) servem para coletar a luz no campo amplo e convergi-la para a lente da câmera. Para minimizar as distorções, esta lente deverá estar o mais próxima possível do modelo.

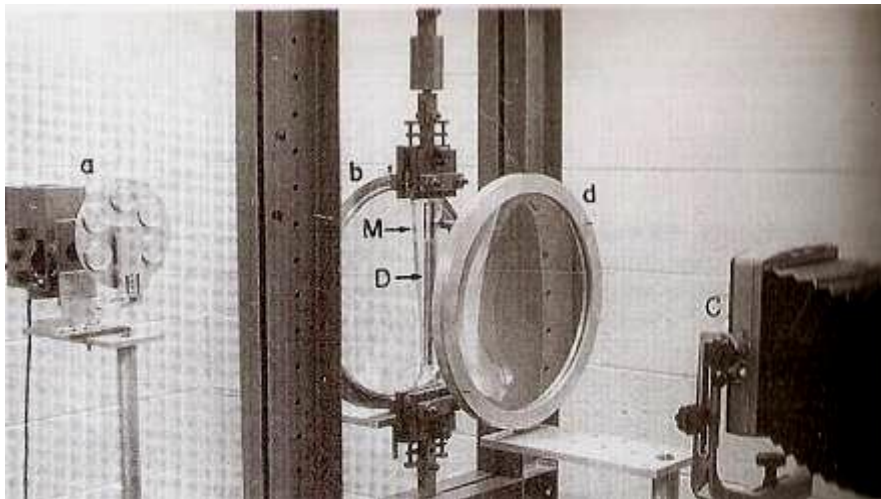


Figura 2.41: Arranjo experimental típico para análise de deformações no plano por *moiré*: (a) fonte de luz; (b) lente colimadora; (M) modelo; (D) retículo de referência; (d) lente de campo condensadora; (C) câmera.

Fonte: (KIESLING, 1966) apud (CLOUD, 1998).

Para garantir que a câmera irá construir a imagem somente com a luz que atravessa o modelo em ângulo normal, a abertura é disposta de forma tal que a distância da câmera à lente é igual a distância focal da lente de campo. Este ponto é especialmente importante se for utilizado um difusor junto à fonte de luz. Em suma, a abertura da câmera deve ser pequena ($f/11$, ou menos), de forma que o pincel de radiação recebido de cada pequena área do corpo-de-prova tenha um pequeno ângulo cônico.

Como mostra a Figura 2.41, os elementos ópticos usualmente são montados em uma mesa óptica, que mantém os alinhamentos e permite o ajuste longitudinal de seus elementos.

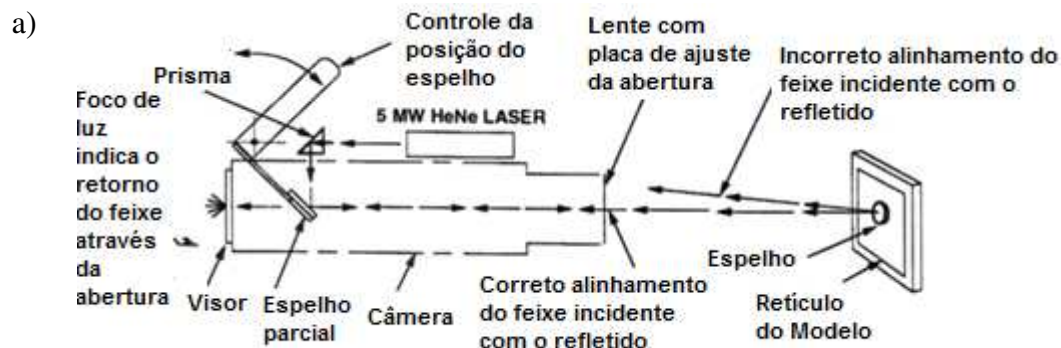
As lentes de campo (condensadora) são sempre um item caro e podem ser eliminadas por uma lente tele na câmera. No entanto, é uma medida que faz a precisão decrescer. A lente longa torna possível posicionar a câmera longe o suficiente do modelo, de forma que a luz utilizada para formar a imagem tenha um fluxo de incidência quase normal ao plano medição. De maneira similar, a fonte de luz pode ser posicionada a uma distância suficiente longe do modelo de forma que elimine as lentes de colimação ou o difusor.

2.4.8.1.2 - O Método da Dupla-Exposição

Se o sistema de gravação (câmera) é capaz de captar com nitidez cada linha do retículo, a técnica de dupla-exposição é uma boa alternativa. A sobreposição ocorre na placa de filme fotográfico (câmeras analógicas), com o mesmo retículo aplicado sobre o modelo servindo para cada estágio de carga, ora como modelo, ora como referência. O modelo é fotografado com nenhuma carga (ou em algum outro estágio inicial), a carga é aplicada e o modelo é fotografado novamente na mesma chapa de filme. As distorções ópticas e a retração do filme afetam igualmente as posições iniciais e finais, e por isto não criam nenhum problema com esta abordagem de dupla-exposição.

Segundo Schwarz (1987), a mudança na distância da câmera ao modelo, ao longo do eixo óptico, pode causar uma ampliação (ou redução) no tamanho do retículo gravado e consequentemente uma alteração no passo do retículo, e isto pode ser interpretado erroneamente como sendo um deslocamento no plano. Para eliminar, ou reduzir, este efeito de movimento fora do plano é sugerido dispor uma guia vertical na máquina universal de ensaios com fixação no piso, junto ao modelo, como mostra a Figura 2.42 (b). Segundo o mesmo autor, outro cuidado importante é manter a ortogonalidade entre o plano focal da câmera e o plano do modelo. Ele executou esta tarefa com um alinhador a *laser* mostrado na Figura 2.42(a).

Para fornecer referências para avaliação e eventuais correções na medição, Xavier (2007) utilizou um *LVDT* acoplado ao modelo para medir deslocamentos fora do plano.



b)

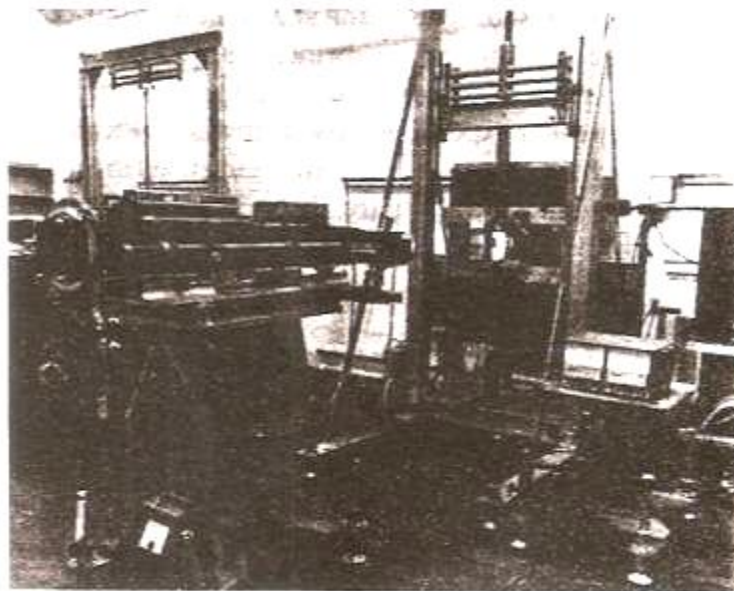


Figura 2.42 - Alinhamento do eixo óptico da câmera ortogonal ao plano do corpo-de-prova (a); Arranjo experimental com máquina de ensaios provida de guia vertical para estabilização do modelo (b).

Fonte: (SCHWARZ, 1987).

Para aplicar a técnica de *moiré* interferométrico (TMI), vários laboratórios utilizaram aparatos especiais para aplicação de carga no modelo sobre a mesa óptica (POST, IFJU e HAN, 1994), (WANG, 2003), (RIBEIRO, 2006).

Não é possível obter-se a visualização em tempo real de franjas com essa técnica. Algum grau de melhoria do fator sinal versus ruído (contraste da franja), bem como algum aumento de sensibilidade pode ser obtido por processamento óptico (filtragem espacial) do negativo

fotográfico exposto duplamente. O maior problema dos métodos de fotografia direta é resultante das limitações fotográficas e seus efeitos na sensibilidade de medição.

Há uma compensação direta entre capacidade de resolução e o tamanho do campo (escala) no processamento de imagens por uma lente.

Por exemplo, uma boa lente de câmera vista em ampliação 1: 1 em um campo de 100 mm é capaz de reproduzir retículos com frequências espaciais da ordem de 20 linhas/mm. Se for usada uma lente de excelente qualidade, e também forem tomadas medidas para estabilizar a câmera⁸ e o modeloe ainda mais, se uma lente de aumento for usada para focalizar a imagem real no plano da emulsão, a resolução pode ser aumentada para algo em torno de 80 linhas/mm. A resolução e o contraste podem ser aumentados ainda mais pelo uso de aberturas otimizadas, e é até mesmo possível usar aberturas com fenda para multiplicar a frequência dos retículos (CLOUD, 1976).

Aberturas com fenda também foram utilizadas para fotografias de retículos com padrões de superfície mais ou menos aleatórios, que têm sido aplicados em grandes objetos (BURCH e FORNO, 1975).

Esta técnica está intimamente relacionada com a técnica da fotografia *speckle* de luz branca. Uma resolução fotográfica muito maior é possível, como provam os desenvolvimentos no campo da tecnologia de chip com semicondutores. A possibilidade de captura é o requisito do tamanho de campo (escala). Para análise de tensões por *moiré*, os formatos típicos de componentes mecânicos são limitados para algo entre 35 milímetros e 200x250mm (8 x 10pol). Cálculos simples mostram que mudanças no formatos não resolvem o problema. Por exemplo, o formato menor, vai ter no plano do filme, uma resolução melhor do que a especificada. Mas sua resolução no modelo será aproximadamente a mesma para o formato de 100 mm, em conjugado 1: 1. Observa-se que o problema não aparece estritamente em preto branco. Com qualquer lente, na medida que a frequência de retículo aumenta, o contraste diminui porque as linhas do retículo de alto contraste são reproduzidas em tons de cinza.

⁸ (CLOUD, 1998) cita exemplos em que a estabilização da câmera é conseguida por enrigecimento com cantoneira de ferro e sobrepeso com blocos de chumbo e placa de aço.

2.4.8.1.2.1 - O Método da Dupla-Exposição em Duas Chapas de Filme

Uma variação da técnica da dupla exposição é fazer a primeira e a segunda exposições em chapas de filme separado. Os negativos são produzidos normalmente e são sobrepostos diretamente para a observação das franjas de *moiré*. Alguma flexibilidade é adquirida pelo fato dos negativos poderem ter pequenos deslocamentos relativos para reduzir os efeitos dos movimentos de corpo rígido. Os dados são armazenados em formato *RAW*⁹, que é conveniente para experimentos envolvendo várias etapas não reversíveis. A segunda placa pode ser uma exposição do modelo, ou pode ser um retículo de referência. Um alto fator de multiplicação na melhoria e sensibilidade de dados pode ser alcançado com o uso desta metodologia juntamente com o processamento óptico. Naturalmente, esse método de fotografia direta sofre das mesmas limitações que a técnica de dupla exposição discutida anteriormente.

2.4.8.1.3 - O Método da Sobreposição Óptica

Um sistema de lentes pode ser usado para criar uma imagem do retículo do modelo em um plano que contém o retículo de referência. Uma câmera pode ser usada para esta finalidade, e o retículo de referência simplesmente substitui o filme titular. O retículo de referência pode ser um negativo fotográfico do retículo do modelo em seu estado descarregado. O método é semelhante às técnicas fotográficas de superposição descritas anteriormente, exceto que neste caso é possível observar a formação das franjas em tempo real. Uma variação deste método é utilizar um retículo separado servindo como referência, que permite o uso da técnica de descompasso de período (*pitch mismatch*). Esta abordagem é baseada no trabalho de Zandman (1967), e tem sido comercialmente disponibilizada por meio de um aparelho analisador de retículos de *moiré*. Este método está sujeito a distorções ópticas, mas o ajuste do passo dos retículos pode ser feito por deslocamento de lentes. A sua sensibilidade máxima novamente é limitada pela relação entre o tamanho do campo versus resolução, devido necessitar da aquisição da imagem das linhas dos retículos.

⁹ Tradução: Raw Data = Dados brutos é um termo para dados recolhidos na fonte que não foi submetido a processamento ou qualquer outra manipulação (dados primários), também conhecido como dados primários. É um termo relativo.

2.4.8.1.4 - Método de Superposição dos Retículos por Projeção

Com retículos de período relativamente largo, é viável projetar o retículo de referência sobre o do modelo usando um sistema de imagens [Figura 2.40 (d)], ou para projetar uma imagem do retículo do modelo no retículo de referência [Figura 2.40 (b), (c)]. Estes métodos têm o recurso de usar o artifício da desfocagem da lente, ou usar uma pequena abertura, para poder utilizar algoritmos mais simples de análise das franjas. A dificuldade é que a não planidade da superfície do modelo, ou distorções devido às aberrações das lentes, venham produzir erros indeterminados. Por outro lado, este arranjo pode ser usado *favoravelmente* para a execução de métodos de deslocamento de fase (KUJAWINSKA, 1998). Neste caso, é relativamente fácil introduzir o desvio de fase, movendo o retículo de referência na direção perpendicular à suas linhas. Ele dá sobreposição direta sem a necessidade de trazer o retículo mestre muito próximo do retículo do modelo. Há perda de luz no espelho parcial por isto, o contraste é reduzido. Esta abordagem tem sido pouco utilizada (SPOTS, 2005).

2.4.8.2 - Os Retículos

A técnica de *moiré* geométrico (TMG) necessita que sejam aplicados no modelo retículos de amplitude com frequência de 5 a 100 linhas/mm. Esta aplicação de retículos pode ser feita por uma extensa variedade de processos. A técnica de *moiré* interferométrica (TMI) requer retículos de fase com frequências muito maiores do que a TMG.

A Figura 2.43 mostra a classificação dos retículos segundo:

- (a) habilidade de transmitir a luz;
- (b) o efeito nas ondas de luz;
- (c) distribuição das linhas em suas superfícies.

Segundo (CLOUD, 1998), os retículos destinados a fazer análise de deformações não são fáceis de obter, fabricar, ou manipular. Eles devem apresentar alto contraste, ter bordas bem definidas; devem ser leves e pouco rígidos, o suficiente para não afetar o comportamento mecânico do modelo sobre o qual eles serão aplicados.

É uma boa técnica utilizar retículos de pontos circulares, separados por espaços livres. Isto evita a interferência do movimento de cada ponto com o de seus vizinhos e por isto, causam menos perturbações no campo de deformações.

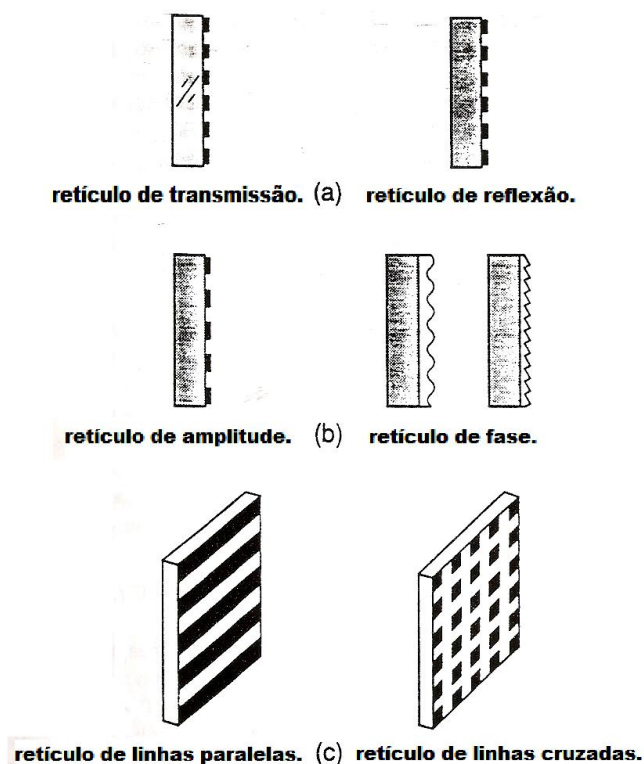


Figura 2.43-Classificação dos retículos, segundo:(a) habilidade de transmitir a luz;(b) o efeito nas ondas de luz; (c) distribuição das linhas em suas superfícies.

Fonte: (CZARNEK, 1993).

A maioria dos retículos comerciais tem uma largura de linha de aproximadamente 50% do período, para produzir franjas de máximo contraste.

Uma vez de posse de um retículo mestre, ele tem de ser aplicado ou reproduzido na superfície da amostra (KAFRI e GLATT, 1990).

A fotografia pode ser usada para duplicar retículo em casos especiais, para fazer variar a largura da linha dos retículos, por meio de variação da velocidade e condições de exposição.

Os retículos muito espaçados, 1 a 5 linhas/mm, podem ser obtidos de fornecedores de artes

gráficas, em folhas de 25 por 50 cm. Artistas comerciais usam retículos de linhas unidirecionais e cruzadas, de diferentes densidades de linha, para sombreamento.

Os retículos de linhas cruzadas podem se apresentar na forma de matrizes retangulares de pontos circulares. Retículos de menor período (5 a 10 linhas/mm) estão disponíveis nas empresas de fotolitografia de alta qualidade e seus fornecedores.

Empresas de instrumentos ópticos fornecem retículos com frequências acima de 40 linhas/mm. Fornecedores da indústria de análise de tensões fornecem retículos de 20 a 40 linhas/mm de linhas paralelas e linhas cruzadas sobre vidro plano transparente, com tamanhos até 25 cm, bem como matrizes metálicas de pontos circulares com período de 20 linhas/mm.

Tabela 2.1 Padrões de retículos aplicados no modelo associados com diferentes materiais.

Fonte: (KAFRI e GLATT, 1990).

Metais	Materiais Porosos	Plásticos, compósitos	Outros
Não-ferrosos (1 a 4)	Concreto (1 a 3, 6)	PCV (4)	Têxteis (5)
Aço (1 a 4)	Tijolo (1,2, 6)	Fibra de carbono (4)	Grafite (4)
	Madeira (1, 2)	Borracha (4, 6)	Pele (3)
	Argila (4)		Cartão (3)

1. Padrão impresso em papel; 2. “*Stripping film*”; 3. Impressão fotográfica direta; 4. Padrões estêncil; 5. Não abordados neste texto; 6. Outros: têxteis, padrões aleatórios com imagem óptica sintonizada (fotografia *speckle*).

Existe uma farta literatura a respeito da fabricação e aplicação de retículos (CLOUD e BAYER, 1988), (CLOUD, RADKE e PEIFFER, 1979); (HOLISTER e LUXMOORE, 1968); (LUXMOORE e HERMANN, 1971); (STRAKA e PINDER, 1974); (ZANDMAN, 1967); (PIRO e GRÉDIAC, 2004).

2.4.8.2.1 - Principais Técnicas de Aplicação de Retículos no Modelo

2.4.8.2.1.a - Retículos Desenhados

A abordagem mais fundamental é desenhar o retículo no modelo ou mestre com régua e caneta. Uma variação moderna usa um sistema gráfico de computador. As densidades são limitadas, é claro, mas para algumas aplicações, o modelo pode ser feito grande o suficiente para contornar o problema de sensibilidade resultante. A técnica de desenhar tem sido usada em estudos de deflexão de placas, onde os requisitos de sensibilidade não são altos como nos casos de análise de deformação.

2.4.8.2.1.b - Formação dos Retículos com Máquinas e Ferramentas

Uma maneira é utilizar um torno mecânico ou uma máquina de moagem para formar o retículo no modelo. Existem muitas variações deste método.

2.4.8.2.1.c - Impressão Fotográfica Direta

O retículo pode ser impresso fotograficamente na superfície do modelo (AUSTIN e STONE, 1976), (LUXMOORE e HERMANN, 1971).

Esta técnica é utilizada na fabricação de circuitos impressos. O modelo é revestido com uma película de emulsão fotossensível, tal como um fotorresiste *Kodak*[®] ou *Shipley*[®] AZ1350J, que após a secagem é exposto à luz ultravioleta contra a máscara que contém o desenho do retículo. Esta emulsão que recebeu a exposição é revelada e lavada. Este processo resulta em uma reprodução fotográfica muito fina e bem aderida do retículo sobre o modelo. Se o modelo for metálico, a emulsão pode servir como máscara, enquanto as linhas do retículo são gravadas por remoção do material por meio de solução ácida. Este método é um dos mais usados, e existem muitas variações. É possível obter bons resultados, incluindo para alta temperatura (CLOUD, RADKE e PEIFFER, 1979).

2.4.8.2.1.d - Filme Fotográfico

O retículo pode ser reproduzido em filme fotográfico e depois colado no modelo. O negativo de filme fotográfico comum é considerado rígido demais para esta aplicação; ele é normalmente substituído por “*stripping film*” utilizado em fotolitografia. Utilizar os filmes conhecidos como “*stripping-films*” é uma técnica comum para a aplicação de um retículo no modelo. Os pontos de preto/branco (padrão cruzado) são reproduzidos fotograficamente provenientes de retículos mestres. Neste tipo de filme, a emulsão fotográfica é suportada pelos dois lados por plásticos finos. Após retirar o suporte de um dos lados, a emulsão fotográfica é aplicada sobre o modelo com cola, mantendo o lado da gravação fotográfica da emulsão contra a superfície do modelo. O adesivo Eastman 910 é indicado para fixação. Deve-se cuidar para garantir o alinhamento perfeito das linhas do retículo com o eixo do modelo.

O plástico de suporte remanescente é removido, deixando o retículo aplicado no modelo. Para bons resultados é necessário ter uma superfície plana e limpa.

2.4.8.2.1.e - Transferência de Retículos Metálicos

Foi desenvolvido um esquema de manusear retículos com duas camadas metálicas de forma semelhante aos “*stripping films*” (ZANDMAN, 1967). Os retículos metálicos são produzidos e formados pela técnica do fotorresiste em uma folha, que é colada em outra folha de aço, que serve de suporte para a primeira. O retículo é colado no modelo por um adesivo epóxi depois da secagem, a folha suporte de aço é removida, deixando o retículo aplicado sobre o modelo.

Este tipo de retículo pode ser usado para *moiré* de transmissão, se for utilizada uma cola epóxi transparente. No caso de *moiré* de reflexão, um excelente contraste é obtido utilizando o retículo metálico contra um fundo de epóxi preto.

Este tipo de retículo é caro e de pequeno tamanho, por isto, sua disponibilidade comercial atualmente é duvidosa.

2.4.8.2.1.f - Método Estêncil

Esse método é muito rápido e eficiente, e foi desenvolvido por Luxmoore e Herman (1971). Em

uma versão, uma tela fina de litografia furada é fixada provisoriamente por uma cola fraca. Uma camada metálica é depositada a vácuo sobre a tela. Quando a tela é retirada, permanece um padrão de pontos circulares metálicos sobre o modelo.

Além do uso de deposição a vácuo, pode ser aplicada tinta ou corante, utilizando a técnica de artistas de estêncil.

Um exemplo deste tipo de aplicação é o realizado por estêncil através de uma malha fina de níquel com 80 furos/mm. A malha é fixada provisoriamente, para permitir o correto posicionamento sobre a superfície por meio de um adesivo fraco. Após a secagem, a superfície é pulverizada com um pigmento branco, por exemplo, dióxido de titânio, que é recomendado para aplicações nos casos de temperatura ambiente ou também em alta temperatura.

2.4.8.2.1.g - Retículos de Fase

São do tipo corrugado ou em dente-de-serra (ver Figura 2.43); são usualmente utilizados na técnica de *moiré* interferométrico (TMI).

Embora possam ser utilizados pela TMG, não serão tratados aqui.

2.4.8.2.1.h - Colagem de Telas Metálicas

Telas metálicas finíssimas de níquel são produzidas pela indústria, para várias aplicações, e vem em frequências de cerca de 40 linhas por mm, ou mais; elas possuem alta exatidão e não são caras. Segundo Cloud (1998), um bom fornecedor deste material é a Buckbee-Mears Corporation.

Estas telas baratas em níquel podem ser cortadas e aplicadas no modelo e utilizadas em altas temperatura. Vários tipos de colas e aglomerantes podem ser utilizados em temperatura ambiente. Para altas temperaturas, a adesão pode ser feita com tinta cerâmica (CLOUD e BAYER, 1988).

As telas devem ser manuseadas com muito cuidado para evitar distorção. Os retículos feitos com esta técnica possuem excelente uniformidade e regularidade.

Os retículos de matrizes de pontos circulares de níquel sobre um suporte separável de folha de

ação estão disponíveis comercialmente. O epóxi de cor preta é normalmente utilizado como meio de transferência, deixando pontos circulares reflexivos com um fundo preto.

Para aplicações em altas temperaturas é preferido um cimento cerâmico branco como meio de transferência. O níquel fica escuro quando é oxidado, produzindo um contraste com o fundo branco.

O caso de materiais macios ou elásticos requer a aplicação do retículo sem nenhuma camada de suporte.

2.4.8.2.1.i - Padrão Impresso em Papel

Tuttle (1997) demonstrou ser possível produzir retículos em impressoras *lasers* de 600 dpi, e mostrou também as suas limitações.

Para tensões muito elevadas, ou para grandes objetos, é bastante comum a utilização de retículos de pontos circulares grandes. Exemplos deste tipo são: impressão com um rolo gravado ou utilizar um tecido texturado colado ou então um papel de parede com faixa.

Estão disponíveis comercialmente, em folhas de papel, negativos impressos a tinta, ou fotolitos, gravados com valores de frequências de retículos na faixa de 2,5 a 6 pontos/mm.

Os padrões impressos em papel podem ser colados nos objetos utilizando-se pasta adesiva do tipo usado para papel de parede. Este tipo de retículo é usado geralmente em grandes estruturas de engenharia tais como edifícios e pontes.

2.4.8.2.1.j - Transferência de Retículos Impressos

O método de transferência do retículo foi realizado primeiro por Zandman (1967) e posteriormente por Piro e Grédiac (2004).

Este método consiste na impressão por um plotter de jato de tinta de alta resolução do retículo sobre um filme resistente. O epóxi ainda no estado plástico é aplicado entre a face impressa do filme e a superfície do modelo, e recebe uma pequena pressão. Após a cura do epóxi, o filme é puxado cuidadosamente, fazendo com que a tinta com as linhas do retículo permaneça sobre a superfície do modelo.

Esta transferência foi reproduzida e aplicada com sucesso neste trabalho, utilizando-se epóxi similar fabricado no Brasil, adaptado para este fim.

2.4.8.2.2 - Os Retículos Mestres

Devido ao alto custo dos retículos de grande tamanho e alta qualidade, a maioria dos usuários mantém um pequeno estoque de retículos de vários tamanhos e densidades de linhas, e depois fazem cópias destes retículos mestres.

Os retículos-cópia (sub-mestres) são usualmente reproduzidos por processos fotográficos e os retículos aplicados no modelo são reproduções fotográficas destes últimos, pertencendo a uma terceira geração de retículos.

Dois tipos de retículos mestres estão disponíveis para fazer cópias:

- retículos mestres de linhas paralelas;
- retículos mestres em cruz: linhas bi-direcionais.

Quando usado em conjunto com o retículo mestre em cruz do modelo, o retículo mestre de linhas paralelas mostrará as franjas correspondentes aos campos de deslocamento u ou v , de forma distinta, dependendo da sua orientação com respeito à direção das linhas do retículo mestre em cruz. De outra forma, se forem superpostos dois mestres em cruz, serão mostrados simultaneamente as franjas de deslocamentos dos campos u e v .

Os retículos mestres são fornecidos por empresas especializadas em aparatos científicos e ópticos. Os retículos de linhas paralelas para *moiré* são encontrados com o nome de redes *ronchi* (*ronchi rulings*) em várias empresas, entre as quais *Edmund Optics*, *Graticules*, *Max Levy*, entre outras. São encontrados retículos com frequências de 5 a 240 linhas/mm, fornecidos em tamanhos

de 2,5 x 2,5cm (1 x 1 polegadas) até 15 x 15cm (6 x 6 polegadas). Estes retículos são produzidos por depósito a vácuo de metal cromo sobre vidro transparente ou gravação fotográfica em filme sobre plástico *mylar* transparente. Podem ser feitos pedidos especiais tais como retículos em duas ou três direções.

2.4.8.3 - Origens dos Ruídos e Imagens-Fantasma

Segundo Post, Ifju e Han (1994), as principais fontes de ruídos e imagens-fantasma podem ter as origens abaixo relacionadas:

- distribuição não uniforme de intensidades luminosas;
- variações ponto a ponto da eficiência da difração do retículo do modelo (TMI);
- ruídos elétricos aleatórios introduzidos pela gravação da imagem pela câmera;
- luz proveniente de diferentes fontes e suas reflexões;
- defeitos do próprio retículo;
- modificações no foco.

Para reduzir estes problemas, a filtragem e o emprego de retículos livres de defeitos são providências usuais.

2.4.8.4 - Rotações e Deslocamentos de Corpo Rígido

Para as técnicas de *moiré* geométrico, embora os deslocamentos na superfície do modelo (plano x, y) sejam medidos independentemente do deslocamento fora do plano (direção z), os movimentos de rotação de corpo rígido acidental em relação a um eixo paralelo às linhas do retículo podem ser registrados como uma aparente diminuição (ou aumento) do período do retículo do modelo, causando o aparecimento de uma falsa compressão (ou tração) na análise dos dados.

Segundo Post, Ifju e Han (1994), o gradiente aparente de franja (compressão) devido a este efeito pode ser calculado, por exemplo, para a rotação em torno do eixo y :

$$F_{xxe} = -f \psi_y^2 / 2$$

onde,

ψ_y = ângulo de rotação determinado pelo reflexo do raio de luz que retorna à fonte;

f = frequência do retículo.

Para o método utilizado neste trabalho, com duas imagens digitais, as translações no plano do modelo (x, y) e as rotações em relação ao eixo (z) normal ao modelo, podem ser anuladas ou minimizadas ao impor-se a coincidência das marcas fiduciais marcadas sobre o modelo.

2.4.8.5 – Franjas de Movimento

Quando o modelo tem um movimento de corpo rígido, o seu retículo move-se também, com deslocamentos iguais, que provocam as chamadas franjas de movimento¹⁰ (GUO, POST e CZARNEK, 1989).

Uma determinada configuração de franjas pode ser formada por uma soma dos efeitos de deformação com os do movimento de corpo rígido. Se o movimento de corpo rígido for conhecido, as franjas a ele relacionadas podem ser subtraídas para determinar as franjas de deformação.

As franjas de movimento podem auxiliar a análise em alguns aspectos, ou serem utilizadas na técnica de descompasso (*mismatch techniques*).

Quando este movimento de corpo rígido é descontrolado, a configuração de franjas diverge do desenho esperado e atrapalha a análise.

¹⁰ Em inglês: carrier fringes

2.4.8.6 – As Lentes e os Objetos de Superfície Difusa e Especular

Segundo (POST, IFJU e HAN, 1994), as lentes modificam a direção da luz por difração. A lei de Snell (equação xx) determina a trajetória de cada raio assim que ele cruza a lente:

$$\frac{\text{sen}\alpha''}{\text{sen}\alpha} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.40)$$

A lei da reflexão é dada por:

$$\alpha = \alpha' \quad (2.41)$$

onde, conforme Figura 2.44, n_1 e n_2 são os índices de refração, e α , α' e α'' os ângulos dos raios incidente refletido e refratado e λ é o comprimento de onda.

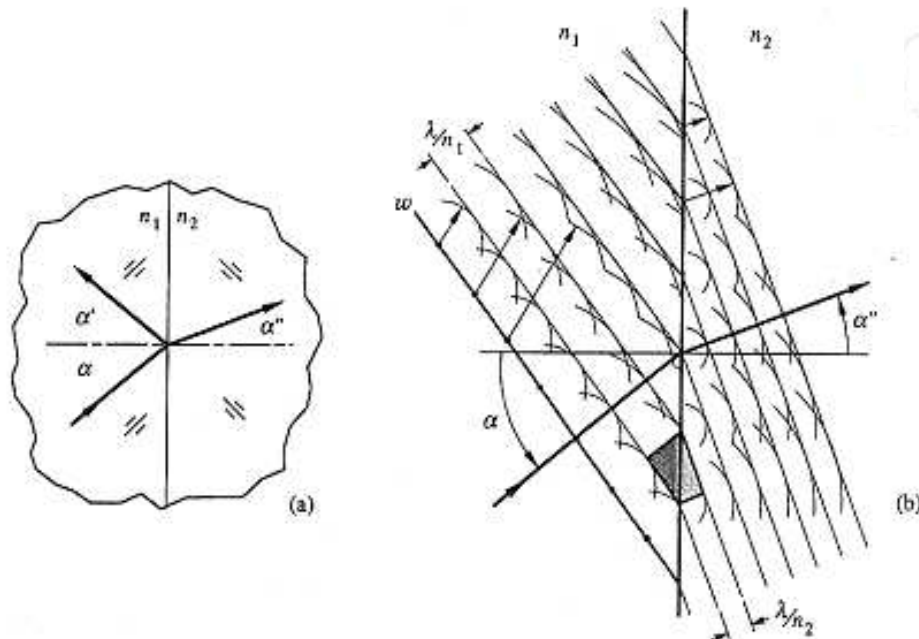


Figura 2.44 – (a) Refração e reflexão em uma interface dielétrica. (b) Construção referente à lei de Snell feita por Huygen.

Fonte: (POST, IFJU e HAN,1994).

A Figura 2.45 mostra como os feixes de onda divergentes se transformam em feixes colimados.

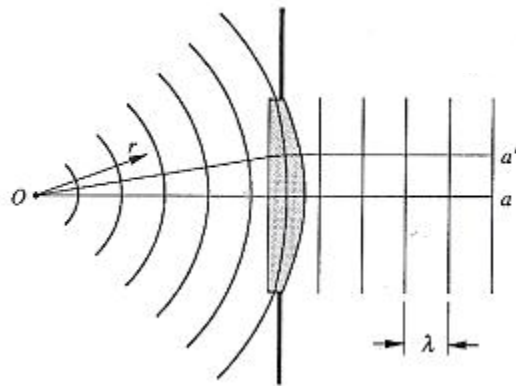


Figura 2.45 – As lentes introduzem mudanças sistemáticas nas frentes de onda.

Fonte: (POST, IFJU e HAN,1994).

As frentes de onda esféricas do feixe divergente são convertidas em frentes de onda planas devido a lente. Uma vez que o comprimento do caminho óptico de todos os raios entre dois frentes são idênticos, os raios \overline{oa} e $\overline{oa'}$ têm comprimentos de caminho óptico iguais. Obviamente, os comprimentos mecânicos são diferentes, mas a espessura óptica das lentes varia justamente para compensar a diferença entre o comprimento dos caminhos óptico e mecânico. O comprimento do caminho óptico, de todos os raios passando pela lente, entre um ponto objeto e a sua imagem, é igual. Isto é uma propriedade importante.

A variação requerida para a espessura da lente, quase sempre, pode ser satisfeita por superfícies esféricas. O funcionamento das lentes pode ser explicado de maneira diferente para objetos de superfície difusa e especular. Apesar de diferentes, estas explicações são suplementares e não existem conflitos entre elas.

2.4.8.6.1 – Objetos de Superfície Difusa

Superfícies difusas, quando observados em escala de comprimento de onda, são rugosas. Quando são iluminadas, cada parte da região reflete, ou, no caso de objetos transparentes, refrata a luz em todas as direções.

A lei de Snell (Equação 2.40), e a lei da reflexão (Equação 2.41), permanecem efetivas em uma escala microscópica, mas a superfície é tão rugosa que o ângulo α local muda randomicamente para cada pequena região. A luz refletida ou refratada é quase igual a de uma fonte de luz, onde a

luz diverge em cada ponto, com frentes de onda esféricas; cada ponto tem fase com variação randômica com relação aos pontos vizinhos.

A superfície especular é lisa e funciona como as superfícies espelhadas. Ela reflete ou refrata a luz de uma maneira sistemática, descrita novamente pelas equações 2.40 e 2.41. Quando um feixe de frente de onda plana incide em uma superfície especular, o feixe refletido ou refratado também tem frente de onda plano.

Os dois casos são pertinentes neste estudo. A técnica de moiré geométrico utiliza superfícies difusas, enquanto que a técnica de moiré interferométrico usualmente utiliza superfícies especulares.

A Figura 2.46 descreve a formação de imagens pelas lentes.

Na Figura 2.46 (a), a superfície difusa iluminada reflete a luz de cada ponto. A porção de luz que emerge de a , coletada pela lente, é redirecionada para convergir para o ponto a' . O ponto a' é a imagem do ponto a e são chamados de pontos conjugados, uma palavra que significa que eles são equivalentes ou inter-relacionados. A luz que emerge de qualquer ponto fora do eixo da lente b é coletado e redirecionado (ou focado) para o ponto b' . Portanto, todos os pontos do objeto são focados para pontos conjugados no plano da imagem, onde uma cópia visual de cada ponto poderá ser vista. No caso da câmera analógica, o filme fotográfico está locado no plano da imagem para fazer a gravação da imagem.

Quando o objeto está no infinito, as lentes convergem a luz para o ponto a' . A distância de a' até a lente é definido como a distância focal da lente (FL). Esta condição é ilustrada na Figura 2.46, em (b) e (c), mas em (c) é formada uma imagem virtual. A luz não é concentrada em a' , mas os raios que emergem do lado direito negativo da lente parecem vir de a' . Claro que os objetos que serão considerados não estarão no infinito, mas no sistema óptico comum ilustrado em (d), onde a luz recebida pela segunda lente parece vir do infinito. O sistema descreve um ponto de fonte de luz que é colimado pela primeira lente e descolimado (ou convergido), pela segunda lente.

Note que as lentes da Figura 2.46 foram desenhadas com a sua maior curvatura faceando o lado de menor obliquidade dos raios. Para reduzir as aberrações, as lentes simples podem ser orientadas de forma que as duas superfícies da lente refratam os raios por ângulos aproximadamente iguais.

Uma relação extremamente valiosa entre as distâncias dos objetos e de suas imagens para lentes finas é:

$$\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} = \frac{1}{FL} \quad (2.42)$$

onde, D_1 e D_2 são as distâncias entre a lente e plano dos objetos e o plano de sua imagem, respectivamente. D_1 e D_2 são positivos quando estiverem dos lados opostos das lentes.

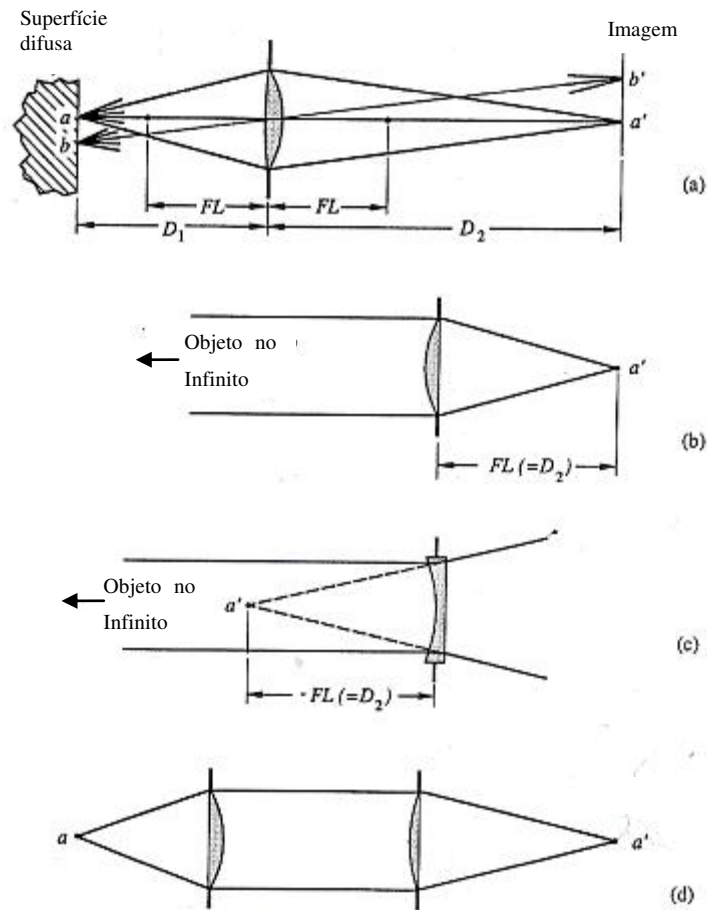


Figura 2.46 - A formação de imagens pelas lentes.

Fonte: (POST, IFJU e HAN,1994).

Esta expressão não é exata quando as lentes têm espessura, mas como as distâncias normalmente são grandes quando comparadas com a espessura da lente, a aproximação é válida.

Esta expressão aplica-se em todos os casos mostrados na Figura 2.34. Em (b), por exemplo, D_1 é infinito, a sua recíproca é zero, e $D_2 = FL$. Em (c), a distância focal de uma lente negativa é uma

distância negativa, que é igual a D_2 . A ampliação M da imagem, ou a relação entre comprimento ab e $a'b'$, é dada por:

$$M = \frac{D_2}{D_1} \quad (2.43)$$

Estas equações 2.42 e 2.43 também podem ser aplicadas em sistemas de lentes compostas, ou para uma série de lentes finas. As equações são aplicadas para cada elemento de lente fina individualmente, sendo a imagem do primeiro objeto considerada como objeto do segundo elemento, etc.

Estas expressões aplicam-se tanto para imagens de superfícies difusas com para imagens de superfícies especulares. Podem ser mencionadas propriedades adicionais que envolvem a qualidade ou fidelidade da imagem. Uma delas refere-se à abertura finita das lentes. A lente da Figura 2.44 (a) intercepta somente uma porção da frente de onda que emana do ponto (a). A luz que se choca com a abertura da lente (ou contorno da lente), é difratada e uma parte cai fora da projeção geométrica de a. Como resultado, a imagem do ponto a não é simplesmente um ponto matemático a' , mas em vez disso, é uma distribuição de luz ao longo de uma área em torno do ponto a' no plano de imagem. Isto limita a resolução da lente, ou a sua habilidade de resolver detalhes finos.

Lentes com aberturas maiores possuem maior resolução do que lentes pequenas, quando todas as outras variáveis permanecem constantes.

As limitações de resolução das lentes aplicam-se em superfícies difusas, mas não se aplicam em superfícies especulares.

2.4.8.6.2 – Objetos de Superfície Especular

Com objetos de superfície especular, o desempenho é diferente. Considere o arranjo da Figura 2.47, onde o objeto é um espelho plano. Seja um feixe de luz, com frente de onda plana, aproximando-se do objeto em incidência normal. Um divisor de feixe foi usado para conduzir a

luz na direção do objeto. O objeto reflete a luz conforme indicado pelas setas, sem distorção da frente de onda. Entretanto, no contorno do objeto, e também nos arranhões ou marcas no objeto, a luz reflete do mesmo modo que nas superfícies difusas.

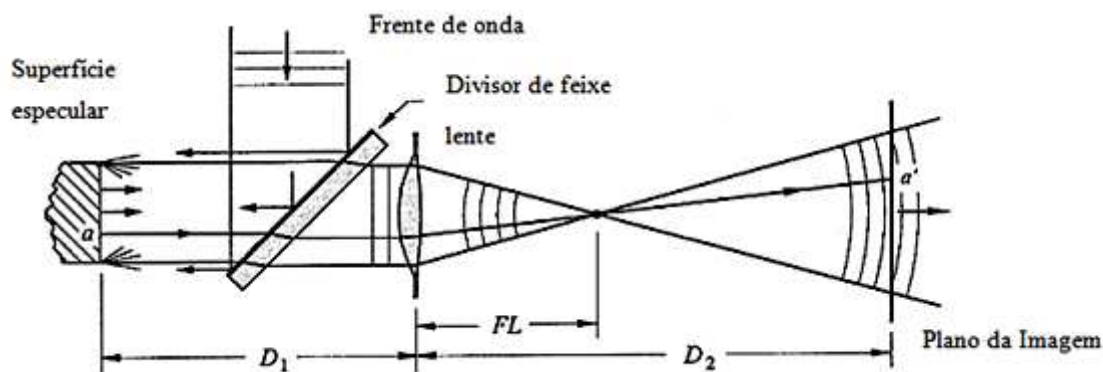


Figura 2.47 – A luz que emerge de um ponto no espelho atravessa a lente segundo a trajetória de uma linha. Pontos no contorno do espelho são exceção; a luz emerge de cada ponto do contorno em todas direções, ela alcança a lente, e parte dessa luz é difratada pelo contorno da lente.

Fonte: (POST, IFJU e HAN,1994).

A luz que parte do contorno do objeto irradia e preenche toda a lente. Ela é depois focalizada pela lente para formar uma imagem do contorno no plano da imagem. A luz proveniente de todas as partes fora das bordas do espelho avança na direção da lente com feixes colimados de frente de onda plana.

A lente converge o feixe para um foco, que depois diverge com frente de onda esférica e atravessa o plano de imagem. Nos limites da imagem do contorno do objeto, o plano da imagem é uniformemente iluminado; mas nenhum detalhe é visto.

Quando dois feixes interferem-se, construtivamente e destrutivamente, formam um padrão de franjas de interferência no plano de imagem; a luz que forma estes padrões pode viajar através da lente sem interceptar o contorno (ou abertura) da lente, de maneira que ela não é afetada pelos efeitos de contorno da lente. Como consequência, os padrões de franjas de interferência projetados no plano da imagem apresentam alto contraste. A única condição é que os feixes de onda distorcidos passem através das lentes.

A formação de imagens pelas lentes de superfícies especulares é muito diferente daquela das superfícies difusas.

Com objetos de superfície difusa a luz emergente de cada ponto preenche a lente, e a lente precisa redirecionar todos estes raios para reuni-los no ponto-imagem. Com objetos de superfície especular, iluminados com luz de frente de onda plana, ou quase plana, a luz emerge de cada ponto do objeto como um raio único; ele entra na lente em um único ponto, atravessa a lente em um único caminho, e viaja como um raio único até encontrar o plano de imagem. Na Figura 2.47 toda luz que emerge do ponto (a) no objeto, viaja segundo o único caminho (aa') até alcançar o ponto - imagem (a').

Em síntese, a resolução da imagem de um objeto especular pela lente da câmera é mais simples porque toda a luz que emerge de cada ponto do objeto viaja por um único caminho até atingir o plano da imagem. Nos objetos de superfície difusa a formação desta imagem é mais complicada (POST, IFJU e HAN,1994).

2.4.9 - Processamento de Dados para a Técnica de *Moiré* Geométrico (TMG)

2.4.9.1 - Generalidades

A natureza digital dos dados utilizados nas fases sequenciais de processamento de franjas torna possível modificar os dados, melhorar a sua qualidade e calcular quantidades físicas relacionadas (GASVIK, 1983).

As operações de processamento de dados disponíveis incluem, mas não são restritas a: subtração de campo de deslocamento de referência, filtragem, máscaramento, operações aritméticas e lógicas.

2.4.9.2 - Subtração de Campo de Deslocamento de Referência

O mapa de mixagem de imagens (interferogramas) obtido para uma determinada condição de carga contém informações sobre o deslocamento em investigação, e também sobre o erro sistemático total, que pode incluir:

- imperfeições de grade de modelo e referência;
- aberrações do sistema óptico;
- rotação inicial dos retículos, etc.

Em *moiré* geométrico digital, este erro sistemático pode ser facilmente removido usando um mapa de referência. Este mapa é calculado para as franjas de *moiré* capturadas quando um modelo é submetido a uma carga inicial (chamada de "mapa de mixagem zero").

Quando o mapa de referência é subtraído do mapa de deslocamento real, o mapa final inclui informações apenas sobre o deslocamento real do modelo. Isso será verdade se o processo óptico no qual as franjas foram capturadas é exatamente o mesmo para os dois casos de carregamento.

2.4.9.3 - Filtragem

Muitas vezes um padrão de franjas, e/ou mapa de fase, está sujeito a ruídos severos de alta frequência que degradam a qualidade dos mapas de deslocamento e de deformação finais. Por esse motivo, os dados (em várias fases de processamento) são filtrados com um filtro passa-baixo, que remove o ruído. No entanto, tais filtros devem ser aplicados com grande cuidado, pois eles também podem modificar os resultados significativamente, especialmente se altos gradientes estiverem presentes nos mapas de deslocamento ou deformação.

2.4.9.4 - Mascaramento

Uma das etapas no processo de reconstrução é mascarar áreas que não pertencem ao domínio do padrão de franja. A máscara também é implementada em áreas onde o contraste de franja é baixo, ou o nível de ruído é demasiado elevado. A aplicação de uma máscara nesta área permite que os cálculos sejam realizados apenas em áreas com valores de intensidade adequadas e portanto, evita erros durante o processamento de dados.

2.4.9.5 - Operações Aritméticas e Lógicas

Vários cálculos em uma imagem ou um grupo de imagens (intensidades, fases, deslocamentos) podem ser executados. As operações mais populares em imagens e mapas de fase são:

- soma;
- subtração;
- diferença;
- multiplicação;
- cálculo de raiz quadrada;
- valor mínimo e máximo, etc.

Essas operações permitem que valores como a deformação de cisalhamento e as constantes do material (módulo de Poisson, módulo de Young, etc.) possam ser calculados.

2.4.9.6 - O Programa *IMAGE J - Image Processing and Analysis in Java*

O *software IMAGE J* é um processador de imagem criado por Wayne Rasband do National Institute of Health, em Bethesda, Md, USA.

Este *software* é de domínio público, com código fonte aberto, também conhecido como *software* livre. O download e documentação do programa puderam ser acessados *online* em 25/04/2011 em <http://imagej.nih.gov/ij/>

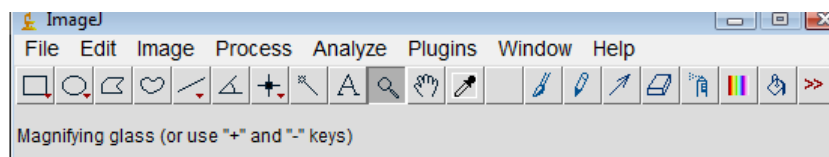


Figura 2.48- Tela principal do programa *IMAGE J*.

O *software IMAGE J* tem um amplo conjunto de habilidades para efetuar operações aritméticas e filtragem, e também possui sub-rotinas de programação e *plug-ins* que o tornam uma ferramenta muito versátil e poderosa.

Neste trabalho, a rotina MULTIFRAN foi desenvolvida pelo autor, para processamento de imagens e multiplicação de franjas.

2.4.9.7 - O programa *Moiré Analysis Software* (MAS)

O programa *MAS* é especializado em extração e análise de dados pelas técnicas de *moiré*, e foi objeto da tese de doutoramento de Wang (2003), pôde ser acessado online em 25/04/2011 no site http://faculty.cua.edu/wangz/software_moire.htm. Trata-se de *software* gratuito, também conhecido como *software* livre.

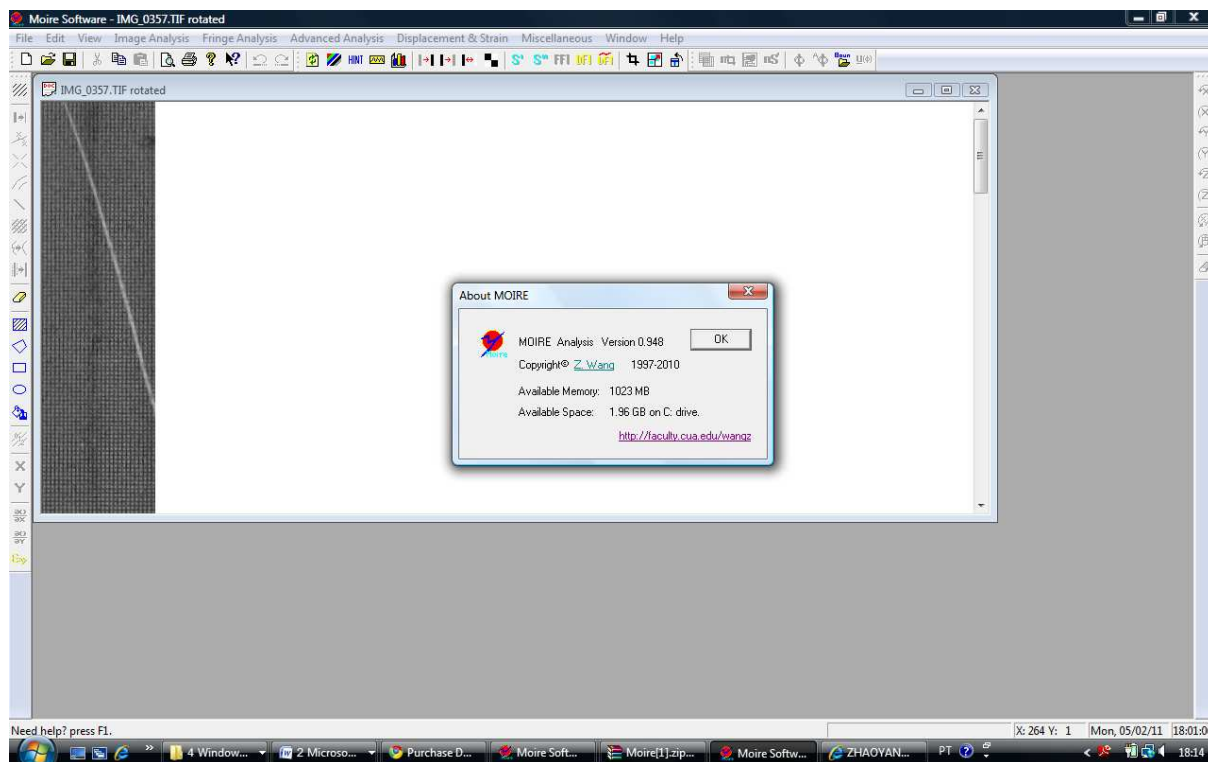


Figura 2.49 - Tela do *Moiré Analysis Software* (MAS)

È um programa bastante completo, que permite fazer a multiplicação de franjas por ODFM a partir de 4 interferogramas, e possui ferramentas para filtros especiais de imagem e extração dos dados de deformação normais nas direções x e y, tendo como base o mapa de deslocamentos fornecidos pelas franjas.

Permite obter também a deformação de cisalhamento e a configuração deformada do modelo.
Fornece saída de dados em listagens e em gráficos 2D e 3D.

3 – MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

3.1 - Considerações Gerais

As normas de projetos de engenharia de estruturas civis limitam as tensões-deformações aos domínios da elasticidade linear.

Se o sistema de extensometria for capaz de medir pequenas deformações, ele é então adequado para a maioria dos materiais estruturais de construção civil.

A Figura 3.1 mostra no diagrama comparativo simplificado tensão-deformação, os comportamentos de diversos materiais.

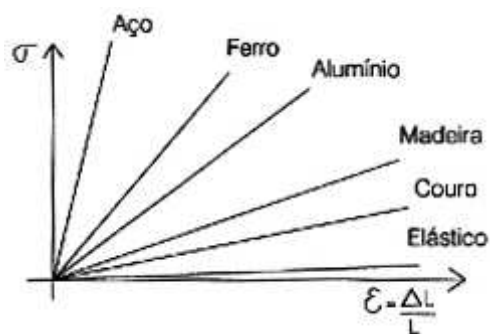


Figura 3.1 – Diagrama comparativo simplificado tensão-deformação de vários materiais.

Fonte: (POPOV, 1978).

A sensibilidade de medição é definida como a capacidade de medir os movimentos da superfície do modelo.

A sensibilidade das técnicas de *moiré* geométrico clássico é uma grandeza exclusivamente proporcional à frequência dos retículos, que podem variar de 1 a 100 linhas por mm.

Devido às dificuldades práticas para gravar os retículos na superfície do modelo, às limitações de sensibilidade, e aos efeitos da difração da luz, as frequências mais utilizadas, relatadas pela bibliografia, são de 20 a 40 linhas por mm.

Em regime elástico, os materiais estruturais de construção civil são capazes de suportar grandes tensões com pequenas deformações, com exceção dos materiais de grande elasticidade e da madeira, como mostra a Figura 3.1.

A técnica de *moiré* geométrico (TMG) clássica possui sensibilidade limitada, causada pela relativa baixa densidade de seus retículos, e por isto a sua aplicação está restrita aos materiais de baixo módulo de elasticidade.

No item 2.4.7.1, Post, Ifju e Han (1994) mostraram que, pelo método óptico-digital de multiplicação de franjas (O/DFM), utilizando micro-deslocamentos do retículo de referência, é possível multiplicar a sensibilidade de uma medição feita com um retículo de cerca de 20 linhas/mm por 10 vezes, equivalendo a uma medição feita com um retículo fictício de 200 linhas/mm. Outros autores citam a possibilidade de multiplicar a sensibilidade por até 20 vezes, utilizando outros métodos de multiplicação de franjas.

Isto corresponde à criação da técnica de *moiré* geométrico com sensibilidade melhorada (TMGSM), que na prática corresponde a um aperfeiçoamento da TMG clássica, porque possibilita a medição de deformações em uma lista maior de materiais estruturais.

3.1.1 - Recursos Utilizados

Foram adquiridos uma impressora jato de tinta, *Canon PIXMA IP4200* com 2400dpi, um *scanner* fotográfico *HPG4050* com 4800x4800 dpi e vários equipamentos de fotografia, incluindo tripés, luminárias e câmeras compacta *Canon Power Shot G10* com 14,7 megapixels e a *Canon REBEL T2i* de 18 megapixels, com Lente MACRO EF-S 60 mm 1:2, 8USM.

Os arquivos dos retículos desenhados inicialmente em AUTOCAD foram plotados em plástico *mylar*, em empresas de fotolitografia.

Posteriormente os retículos acima foram fotolitografados sobre os modelos, por exposição à luz ultravioleta.

Foi utilizada a máscara de solda fotográfica *Carapace*[®] da *Electra*, com solvente, aplicada com aerógrafo.

Outras tentativas foram feitas com diversos materiais das fábricas de circuitos impressos.

Foram feitos ensaios no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMC) da FEC-UNICAMP, no Laboratório de Monitorização de Estruturas (LABMEM) da FEC-UNICAMP, no Laboratório de Propriedades Mecânicas de Materiais Biológicos da FEAGRI-UNICAMP, no Laboratório de Óptica do IFGW-UNICAMP, no Laboratório de Mecânica de Solos e Geotecnia da Escola Politécnica da USP (PEF), no Laboratório de Caracterização de Materiais do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (LACAM), no Laboratório de Mecânica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo e no Centro de Engenharia e Automação do Instituto Agrônomo de Campinas CEA-IAC, em Jundiaí.



Figura 3.2-Equipamentos utilizados.

Vários corpos-de-prova foram preparados na oficina mecânica da FEAGRI-UNICAMP, e outros, em várias empresas particulares.

3.1.2 - Diretrizes da Pesquisa

Para implantação da técnica de *moiré* geométrico foram gravados retículos no modelo.

Constatou-se que retículos mestres em vidro, com frequências de até 240 linhas/mm, com alta resolução, podem ser comprados diretamente na empresa Edmund Optics (EUA).

Constatou-se, porém, que este tipo de empresa não tem filiais na América do Sul, e que, por isto, com a taxação e impostos, estes retículos alcançariam um custo proibitivo para iniciar o trabalho, frustrando as primeiras expectativas.

Devido a este cenário, a tese que se imaginava inicialmente como tendo um caráter teórico-experimental ganhou um caráter tecnológico-experimental.

Foram, então, utilizados recursos existentes na indústria de fabricação de circuitos impressos, adaptados para utilização em medição de deformação.

3.2 - Os Retículos

3.2.1 - A Obtenção dos Retículos

3.2.1.1 – Retículos Formados por Impressão em Jato de Tinta

As primeiras impressões por jato de tinta com 600 e 1200 dpi, sobre transparências, não mostraram boa qualidade.

Adquiriu-se uma impressora *Canon* de 2400dpi. Apesar da resolução maior, após exaustivos testes, percebeu-se também que a qualidade dos retículos mostrou-se inadequada para a utilização em TMG.

Este aspecto pôde ser evidenciado no microscópio do Laboratório de Óptica do IFGW - Unicamp (Ver Figura 3.3).

Na Figura 3.3 (a) é possível perceber defeitos microscópicos sob forma de borrifos de tinta neste tipo de impressão (jatos de tinta), e em (b) a formação de um efeito *moiré*-ruído, formando conjuntos de uma espécie de “quarteirões” periódicos em torno de pontos agrupados.

Caso a impressora tenha o padrão de referência em polegadas, os retículos impressos com períodos que não sejam múltiplos de polegadas apresentam efeito de *moiré*-ruído, devido à redistribuição para fracionamento dos elementos unitários de imagem (pixels).

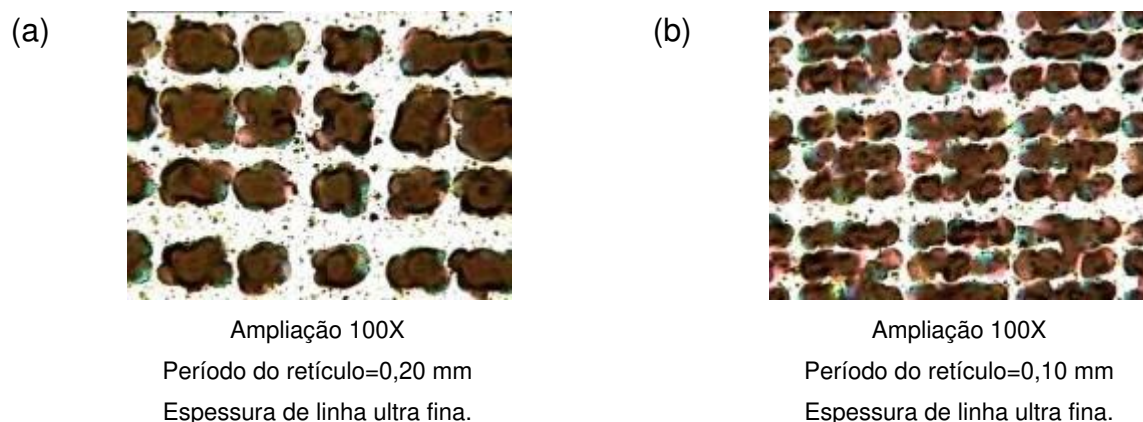


Figura 3.3- Microscopia do retículo impresso em poliéster e transferido para o epóxi. Imagens do Laboratório de Óptica-IFGW-UNICAMP. Impressora jato de tinta *CANON PIXMA IP4200*, com resolução de 2400 dpi.

Veja na tabela 3.1 as resoluções de impressão com padrão de referência em polegadas (dpi) que satisfazem a condição para não ter o *moiré*-ruído.

Cabe observar que infelizmente as impressoras comerciais disponíveis não satisfazem esta condição, e por isto o método de impressão para produzir retículos foi abandonado.

Tabela 3.1 -Resoluções múltiplas de polegada.

dpi	linhas/pol.	linhas/mm	passo (mm)
100	0,010000	3,94	0,254
200	0,005000	7,87	0,127
400	0,002500	15,75	0,0635
500	0,002000	19,69	0,0508
800	0,001000	31,50	0,03175
1000	0,001000	39,37	0,0254
1600	0,000625	62,99	0,015875
2000	0,000500	78,74	0,0127
2500	0,000400	98,43	0,01016

3.2.1.2 – Retículos Formados por Fotolitografia

Foram feitos diversos testes com retículos produzidos por fotolitografia.

Neste tipo de produção foi possível obter resultados razoáveis com retículos com passos de até 0,10 mm (10 linhas por mm).

Constatou-se que os fotolitos produziram retículos com contrastes de linhas, dimensões e definição de bordas com qualidade muito superior aquela das impressoras jatos de tinta, mas também apresentavam o fenômeno do *moiré*-ruído (ver Figura 3.4).

O problema de *moiré*-ruído só foi definitivamente resolvido quando se adotou como norma para a confecção dos retículos as dimensões de período correspondentes aos períodos de 100 e 200 dpi da tabela 3.1, com as espessuras de linha de 50% do período.

Embora se tenha notícia da existência de *softwares* baseados em métodos que utilizam a transformada de Fourier FFT para remover os *moiré*-ruído, a simplicidade, e confiabilidade, do simples redimensionamento dos períodos e espessura de linhas prevaleceu.

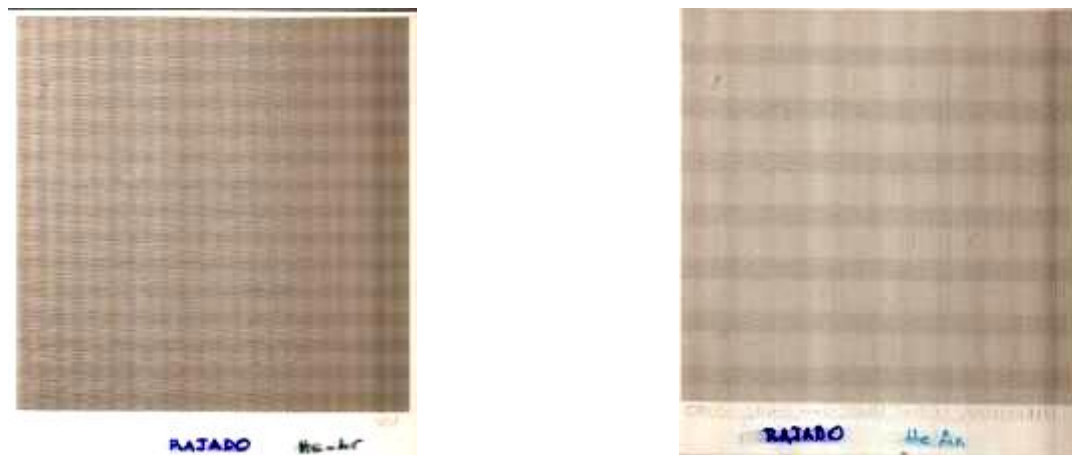


Figura 3.4-Retículos com períodos e espessuras de linhas não múltiplos de polegadas apresentam *moiré*-ruído.

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram a microscopia de retículos fotolitografados em *mylar* transparente de 0,18 mm de espessura, produzidos em foto-*plotter laser* de Hélio - Argônio e Hélio - Neônio, respectivamente.

Constatou-se também que, ao se fazer a superposição destes retículos buscando a perfeita coincidência das linhas, as franjas desaparecem, e que estavam isentos de defeitos grosseiros perceptíveis. Este último fenômeno é conhecido como “*null- balance*”.

Foi considerada um sucesso a produção destes retículos ditos de boa qualidade. Entretanto, estes resultados contrastam com o fato de que a bibliografia consultada relata que a frequência dos retículos de baixa densidade da TMG é de 20 a 40 linhas por mm, e o retículo mais denso que foi aqui produzido possui 7,87 linhas por mm.

Por isto, fica fácil entender as limitações tecnológicas deste processo ao se comparar a resolução do *foto-ploter* de 8000 dpi utilizado neste trabalho, produzido com equipamentos voltados para a indústria de circuitos eletrônicos, com a resolução dos equipamentos utilizados pelas empresas de óptica científica, equivalente a 127000 dpi.

Examinando as Figuras 3.5 e 3.6, observa-se que o retículo feito com o foto plotter *laser* de Hélio-neônio apresenta um melhor contraste e definição de bordas das linhas

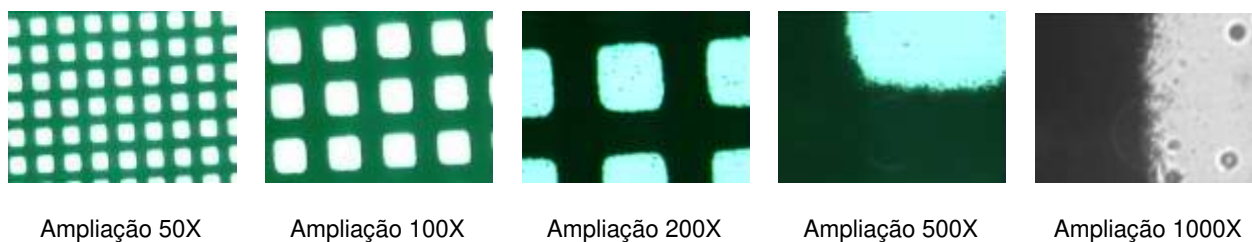


Figura 3.5- Microscopia do retículo em *mylar*, com período de 0,127 mm e espessura da linha de 0,0635 mm; Imagens do Laboratório de Óptica- IFGW-UNICAMP. Fabricação foto plotter *laser* He-Ar da BARCO Crescent de 8000 dpi.



Figura 3.6- Microscopia do retículo em *mylar*, com período de 0,254 mm e espessura da linha de 0,127 mm; Imagens do Microscópio da Multi Circuitos Tecnologia; Fabricação: fotoploter *laser* He-Ne de 8000 dpi.

3.2.2 - A Aplicação dos Retículos no Modelo

3.2.2.1 - Colagem de Vinil Impresso

A primeira aplicação do retículo no modelo foi feita por impressão de um vinil com adesivo, do tipo utilizado em banners.

As baixas resoluções do plotter aliadas à alta deformabilidade do vinil produziram franjas de descompasso permanentes. A inexatidão periódica impossibilitou a coincidência perfeita das linhas do retículo do modelo com as do retículo de referência, e não produziu o efeito “*null balance*”, descrito em 2.4.6.1.

3.2.2.2 - Transferência de Retículo Impresso

A segunda aplicação do retículo foi feita por transferência das linhas de tinta do retículo, impressos sobre poliéster alumínio, para o epóxi branco, ainda plástico, aplicado sobre o modelo (Ver Figura 3.7).



(a) Transferência do retículo impresso em jato de tinta do poliéster para o corpo-de-prova.



(b) Franjas de *moiré* geradas pela superposição do retículo de referência com o retículo já transferido para o modelo.

Figura 3.7-Transferência do retículo impresso no poliéster para o modelo.

A impressão foi feita pela impressora jato de tinta de 2400 dpi e a planidade da moldagem foi assegurada por uma placa de vidro grosso de 1 cm de espessura, com uma folha de acetato para

servir como desmoldante. Este procedimento é semelhante ao utilizado nos experimentos de Piro e Grédiac (2004) e Zandman (1967).

Embora a transferência do retículo tenha sido bem sucedida, a qualidade dos retículos impressos não cumpriu os requisitos (ver Figura 3.3).

Procurou-se uma resina epóxi semi-flexível fabricada no Brasil, com as propriedades similares às da resina E504T fabricada pela *Épotecny*[®] (Fra), utilizada nos experimentos de Piro e Grédiac (2004).

Para conseguir a pigmentação branca foi adicionado corante de dióxido de titânio à resina.

Esta mesma resina epóxi foi aplicada como revestimento de aproximadamente 0,1 mm de espessura, sobre corpos-de-prova de aço, madeira, cerâmica e concreto (ver Figura 3.8).



Figura 3.8- Corpos-de-prova de madeira, concreto e compósito concreto-cerâmica, revestidos com resina epóxi branca de aproximadamente 0,1mm.

3.2.2.3 – Gravação por Fotolitografia

A terceira aplicação de retículos sobre o modelo foi feita por fotolitografia.

A fotolitografia é usada desde a década de 1970 nos processos industriais de produção de placas de circuitos impressos.

Uma descrição sumária do processo de aplicação de um filme seco fotorresiste para produção de placas de circuitos impressos está no anexo A.

Uma descrição completa do processo pode ser encontrada em uma dissertação de mestrado da Faculdade de Engenharia Elétrica da Unicamp (FIORAVANTE JUNIOR, 2004).

As especificações de materiais e equipamentos, dosagens e procedimentos: de secagem, exposição e revelação são semelhantes em todos os processos, variando conforme as características específicas dos materiais e equipamentos utilizados.

Em todos eles existe necessidade de uma calibração prévia dos parâmetros, que é feita por tentativa e erro.

Uma descrição detalhada de temperatura e tempo de secagem do material; dosagem e tempo de exposição à luz UV; tempo de revelação e diluição do revelador é feita em 3.2.2.3.2.

3.2.2.3.1 - Gravação por Fotolitografia no CEA - IAC

A primeira aplicação de retículo no modelo por fotolitografia foi feita no Centro de Engenharia e Automação do Instituto Agrônomo de Campinas CEA-IAC, em Jundiaí, onde foi aplicado um spray com um fotorresiste PRP da Electrolube (UK) sobre o modelo, e a exposição do retículo à luz ultravioleta foi feita por uma lâmpada fluorescente UV Actinic BL da Philips (Figura 3.9).

Uma chapa metálica recebeu uma fina camada, aplicada pelo aerosol do produto fotorresiste, que foi seco a 50° C por 20 minutos. Em seguida a máscara (fotolito), com o desenho do retículo, foi colocada em contato com a chapa e exposta à luz UV. A revelação foi feita com solução de 1 parte do revelador PDN da Electrolube, com 4 partes de água por cerca de dois minutos. Para a exposição, foram experimentadas várias distâncias e tempos. Embora a cor do produto seja verde, e o manual informar sobre a produção de uma imagem de alto contraste, nada pôde ser observado, com exceção das bordas do modelo.



Figura 3.9-Ensaio preliminar com a luz UV e o *photoresist* PRP da *Electrolube*-CEA-IAC, Jundiaí.

3.2.2.3.2 – 1ª Gravação por Fotolitografia no IFGW-Unicamp

A segunda gravação de retículo por fotolitografia foi feita no Laboratório de Óptica do IFGW-UNICAMP (Figura 3.10).



(a) Preparo de corpo-de-prova de madeira.



(b) Mini-centrífuga para controle da espessura do fotorresiste.



(c) Propriedades da fonte UV.



(d) Aspecto da câmara expositora.

Figura 3.10- Gravação por fotolitografia em madeira; Laboratório de Óptica IFGW-UNICAMP.

Foram preparados 3 pequenos corpos-de-prova de madeira 1 x 1 x 0,1cm [Figura 3.10 (b)], com rugosidades diferentes:

- Cp01 - Rugosidade quase natural, acabamento com lixamento sem pintura.
- Cp02 - Rugosidade reduzida, acabamento com lixamento e pintura colorgin branco fosco em 4 demãos.
- Cp03 - Rugosidade “casca de ovo”, acabamento em fórmica clara em lâmina.

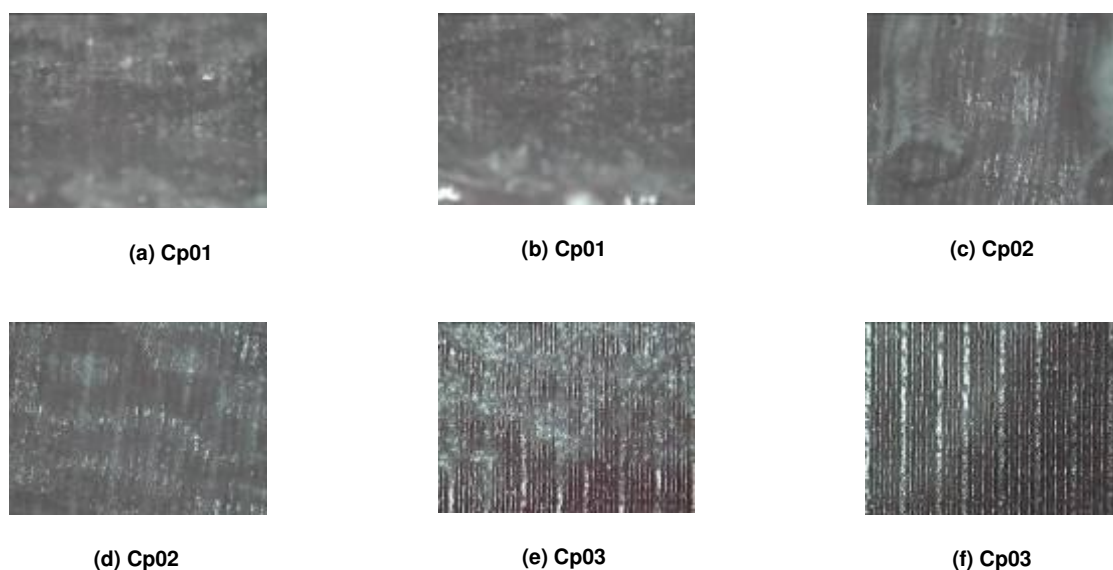
Os corpos-de-prova de madeira receberam a aplicação de uma fina camada de resina fotorresiste positiva AZ1518, com espessura de 5μ . A espessura do fotorresiste aplicado foi controlada pela rotação dos corpos-de-prova fixados a vácuo sobre a mini-centríga com 1000 rpm em 30 segundos.

O fotorresiste foi seco em um forno elétrico por 20 minutos a 70°C .

Um retículo de 20 linhas fotolitografado em plástico *mylar* foi colocado em contato sobre a superfície do corpo-de-prova, e foram expostos à luz UV durante 5 minutos.

Foi utilizado o revelador AZ351 diluído em 1 para 4 partes de água. A revelação durou de 50 segundos a 1,5 minutos.

Estes procedimentos foram repetidos para cada corpo-de-prova. Os resultados estão mostrados na Figura 3.11.



Cp01 - Rugosidade quase natural, acabamento com lixamento sem pintura.

Cp02 - Rugosidade reduzida, acabamento com lixamento e pintura colorin branco fosco em 4 demãos.

Cp03 - Rugosidade “casca de ovo”, acabamento em fórmica clara em lâmina.

Figura 3.11-Microscopia (x100) de corpos-de-prova de madeira com diversos padrões de rugosidade com gravação por exposição à luz ultravioleta de retículos de período $g=0,05\text{mm}$;Laboratório de Óptica IFGW-UNICAMP.

O contraste das franjas ficou comprometido porque a resina é transparente. Deve-se lembrar que, quando existe a trilha de cobre, não há necessidade de a resina ser opaca, pois o desenho do circuito é formado pelo cobre. Neste caso, segundo a bibliografia, poderia ter sido utilizado

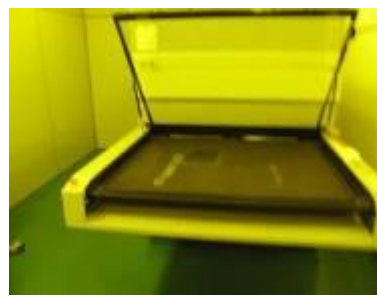
corante para provocar o contraste. De qualquer maneira ficou evidenciada que a qualidade da gravação é favorecida em superfícies mais lisas.

3.2.2.3.3 – Gravação por Fotolitografia na empresa MLC

Uma gravação de retículos por fotolitografia foi feita na empresa MLC em São Paulo, gravando o retículo com 7,87 linhas/mm sobre um revestimento epóxi branco de 1 mm, aplicado em uma barra de aço doce prismática de dimensões 9x50x500 mm. Ver Figuras 3.12. e 3.55.



a) Após a aplicação do fotorresiste com spray os modelos foram secos em estufa.



b) Os modelos e o o fotolito com os retículos são posicionado na máquina expositora.



c) Exposição à luz UV.



d) Revelação em solução aquosa de CaCO_3 .

Figura 3.12-Gravação dos retículos nos modelos por fotolitografia na empresa LMC, para posterior ensaio no LEMC - UNICAMP.

A aplicação do material fotorresiste foi feita por spraye após a exposição, não houve revelação automática, pois os corpos-de-prova não passaram nos vãos dos roletes da máquina de revelação, devido à sua espessura (9 mm).

A revelação foi feita manualmente e de cinco unidades só se aproveitou um modelo. Nunca mais se conseguiu repetir a gravação deste retículo mais denso em fotorresiste, apesar de várias

tentativas terem sido feitas em várias empresas, por mais de um processo. Atribui-se este sucesso único ao fato da revelação manual ter permitido a inspeção visual instantânea do resultado e, por isso, possibilitou a redução da espessura efetiva do fotorresiste, por lavagem, para valores próximos, ou inferiores a 15 μm .

Esta foi a única gravação por fotolitografia bem sucedida, de aplicação de fotorresiste com spray, e de gravação do retículo de período = 0,127 mm (7,87 linhas/mm).

Este único corpo-de- prova foi ensaiado no LEMC posteriormente (ver item correlato).

3.2.2.3.4 – 2ª Gravação por Fotolitografia no IFGW-Unicamp

Repetiu-se a aplicação do fotorresiste pelo método do spray no Laboratório de Óptica do IFGW-UNICAMP.

O forresiste utilizado neste experimento foi indicado pelo mesmo fornecedor do material usado no experimento de 3.2.2.3.3. Denomina-se máscara de solda fotográfica *Carapace[®] EMP 110 LPI Soldermask da Electra* (UK).

Para se aplicar o forresiste sobre a superfície do modelo com um aerógrafo de bico fino, foi necessário diluí-lo com solvente, devido a sua consistência pastosa. O solvente utilizado foi o éter butílico do etilínoglicol butilglicol.

A espessura da camada de fotorresiste aplicada foi estimada em cerca de 30 μm .

Repetiu-se os procedimentos pertinentes do ensaio descrito em 3.2.2.3.3e constatou-se que, mesmo com até quase uma hora de tempo de exposição, não havia contraste.

Atribuiu-se o insucesso desta gravação à falta de uniformidade e excesso de espessura da camada do fotorresiste.

3.2.2.3.4 – Gravação por Fotolitografia Diretamente sobre o Aço

Foram feitas várias gravações diretas sobre o aço doce, por fotolitografia, em várias empresas.

Nestes experimentos foram utilizados a experiência, os equipamentos e materiais disponíveis na linha de produção de circuitos impressos. A novidade foi utilizar o método das telas de *silkscreen* para controlar a espessura de aplicação do fotorresiste.

Porém, os retículos eram muito mais finos e pouco espaçados do que os usuais e a superfície do aço cru não fornecia um fundo de realce. Não houve contraste.

3.2.2.3.5 – Gravação por Fotolitografia sobre o Aço em Duas Camadas

Na empresa Multicircuitos Tecnologia, finalmente, o retículo de 3,94 linhas/mm (período 0,254 mm), foi gravado com qualidade satisfatória, como pode ser visto na Figura 3.13.

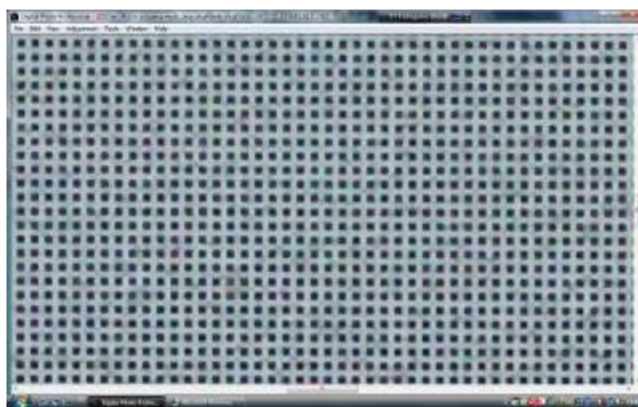


Figura 3.13- Retículo He-Ne de período 0,254mm gravado por exposição à luz ultravioleta sobre fundo branco epóxico de aproximadamente 10µm de espessura, zoom 200% - ~ 8 pixels/período.

A gravação foi feita em duas camadas totalizando cerca de 40 µm. Na primeira, um tipo de fotorresiste bicomponente epóxi branco foi aplicado por *silkscreen*, e levado ao forno para secar. Neste procedimento, esta camada perdeu as características de fotossensibilidade e serviu como revestimento para cobrir as irregularidades da superfície do aço doce e, também, como fundo de realce branco para o fotorresiste de cor azul, que foi aplicado sobre ele. Lamentou-se que a

gravação dos retículos de 7,94 linhas/mm não apresentou a mesma qualidade satisfatória do retículo de 3,94 linhas/mm.

Esta baixa frequência tem o inconveniente de necessitar um fator de multiplicação de franjas β mais alto, para sensibilizar as baixas deformações, considerando o comprimento base (*gauge*) de 100 mm do modelo. E produz muito ruído para este sistema de 256 níveis de cinza (8 bits).

Os retículos de frequências de 7,87 linhas/mm alcançam o dobro de sensibilidade, e aproveitam melhor o potencial óptico de resolução da câmera.

Observa-se que a câmera aqui utilizada é capaz de resolver um retículo de 100 mm de comprimento com até 20 linhas/mm.

3.2.2.3.6 – Gravação no Fotorresiste em Filme Seco e Transferência para o Modelo

Tentou-se outra vez, na mesma empresa Multicircuitos Tecnologia, a gravação do retículo de 7,87 linhas por mm, desta vez utilizando o processo do filme seco, que tem inúmeras vantagens de produtividade e flexibilidade de aplicação. Uma descrição do processo de gravação em filme seco está no Anexo A.

Desta vez foi possível transferir o filme seco para o epóxi ainda plástico na superfície de um material poroso, após aderir o filme com a gravação do retículo sobre uma placa de vidro, (ver Figura 3.14).

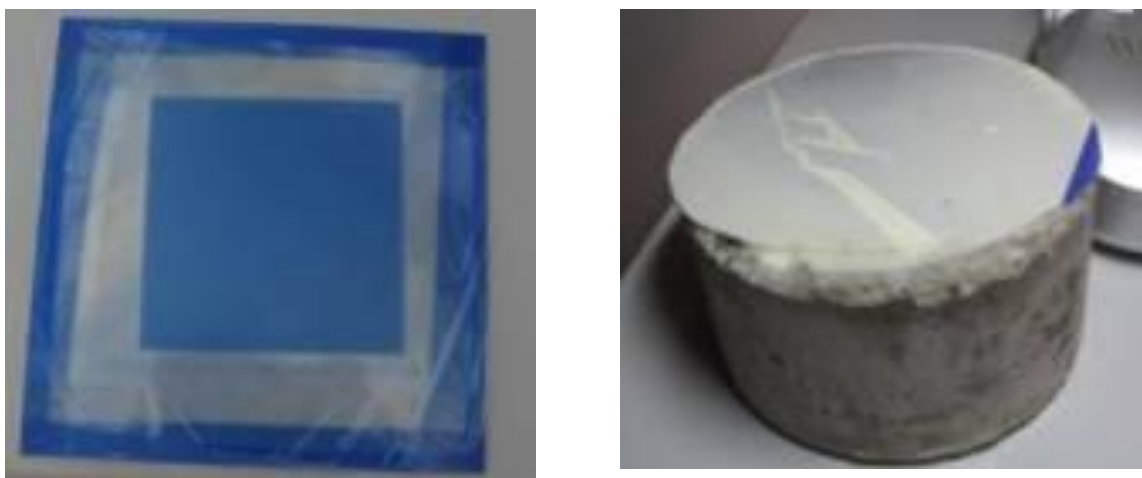


Figura 3.14 - O retículo de 7,87 linhas/mm gravado em filme seco sobre placa de vidro plano (esquerda); transferência do retículo para a peça de concreto sobre o adesivo epóxi branco (direita).

Neste exemplo, o material foi o concreto, mas poderia ser madeira, aço ou cerâmica.

Este processo elimina a passagem do modelo na máquina de exposição e revelação e por isto, flexibiliza a aplicação da técnica de *moiré* TMGD, para praticamente todos os materiais estruturais de construção e permite a gravação de retículos em até 1,10 x 1,10 metros (tamanho do painel de exposição).

Entretanto, a gravação do retículo de 7,87 linhas/mm não ficou satisfatória (ver Figura 3.15), porque a espessura do filme seco de 50 μm , utilizada para circuitos impressos é excessivamente grossa para sensibilizar estas linhas muito finas e próximas (ver tabela 3.2).

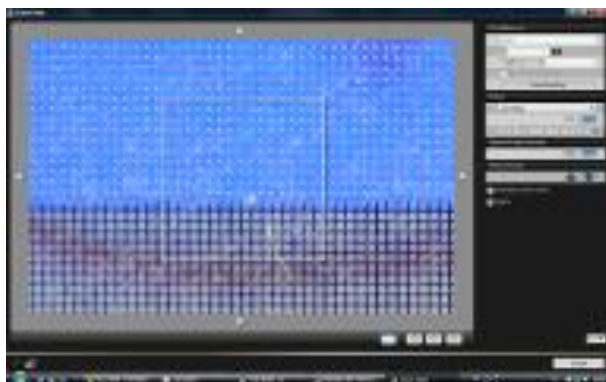


Figura 3.15 - Diferença entre a gravação em filme seco azul de 50 μm de espessura e a máscara original $g=0,127$ mm. Observar o engrossamento das linhas azul claro.

Constata-se que as espessuras utilizadas pela indústria de circuitos impressos e comercializadas em pronta entrega no Brasil são de 40e 50 μm . Observando-se a tabela 3.2 conclui-se que as espessuras menores ou iguais a 15 μm são mais adequadas para cumprir as finalidades pretendidas.

Tabela 3.2-Espessura máxima de filme em função do período do retículo
(por projeção dos dados de (FIORAVANTE JUNIOR, 2004))

ordem	espessura máxima do filme μm	Passo do retículo mm	Espessura da linha mm	Frequência Linhas/mm	Sensibilidade $\mu\text{m}/\text{N}$	$\varepsilon(\mu)/100\text{mm}$ $\beta=32$ mínimo
#1	63,5	0,254	0,127	3,94	254	79
#2	31,75	0,127	0,0635	7,9	127	40
#3	15,875	0,0635	0,03175	15,75	63,5	20

Estes filmes secos de espessura igual ou menor do que 15 μm poderão ser importados juntamente com retículos mestres de alta resolução em vidro produzidos por empresas de óptica científica, para retículos sub mestres, que, após a padronização de procedimentos laboratoriais, poderão ser utilizados de forma econômica e corrente.

Cabe lembrar que os retículos de período 0,254 mm, ou maior, gravados aqui com sucesso, poderão ser utilizados em comprimentos base maiores. Neste caso, será necessário equipar a câmera com novas lentes para enquadrar estes objetos maiores.

3.2.2.4 - Colagem Direta do Fotolito no Modelo

Numa primeira avaliação, foi bem sucedida a técnica de utilização de epóxi branco, como base plana para aderir o fotolito transparente contendo as linhas do retículo ao modelo com cola araldite transparente. Esta se mostrou também ser uma solução econômica porque os fotolitos são adquiridos nas empresas comerciais de fotolitografia, e podem ser aplicados na maioria dos materiais, utilizando a ponte de aderência epóxi.

Este procedimento acabou em parte com o problema de reprodução do retículo de 7,87 linhas por mm.

È sabido que a continuidade material do retículo provoca restrições ao livre movimento dos pontos. Porém, estes efeitos são de pequena magnitude quando se tem pequenas deformações,

pois, o plástico *mylar* tem módulo de elasticidade muito baixo. Deve-se lembrar também que as espessuras do *mylar* e do epóxi são pequenas, 0,18 e 0,1 mm, respectivamente.

Mesmo que isto não fosse totalmente verdadeiro, a utilização híbrida desta técnica de *moiré* geométrico digital (TMGD) com pelo menos um extensômetro colado no modelo permitirá fazer a calibração geral do sistema.

3.3 - A Digitalização dos Retículos

3.3.1 - Digitalização dos Retículos com *Scanner*

Inicialmente foi utilizado um *scanner* multifuncional HP Photosmart 1300 com 1200x1200 dpi, e em seguida um *scanner* fotográfico HP 4050 com 4800x4800 dpi.

As imagens do retículo de 0,127 mm de período obtidas neste último *scanner* alcançaram 20 pixels/período, com boa qualidade de imagem. Este resultado é muito melhor do que o de uma câmera, que consegue adquirir a mesma imagem com cerca de 5 pixels por período, somente.

Contudo, a velocidade do motor destes *scanners* comerciais não é constante, e este fato comprometeu a repetibilidade, a exatidão e a precisão da medição.

Testes foram refeitos com o *scanner* fotogramétrico Ultrascan 5000 da empresa Alezi Teodolini, em São Paulo. Novamente foram obtidos 20 pixels por período, só que desta vez com grande precisão e exatidão. Foi o melhor resultado obtido até o momento para digitalização de imagem.

Lamentavelmente, o custo de cerca de trezentos mil reais e peso de quase 100 kg inviabilizou o emprego deste equipamento nos ensaios.

3.3.2 - Digitalização dos Retículos com Câmera Fotográfica Digital

O ramo fotográfico que utiliza equipamentos com requisitos semelhantes aos desta pesquisa é a macrofotografia. Os praticantes de macrofotografia especializam-se em tirar fotos de flores e insetos. O recurso de macro das câmeras é o destaque desta modalidade. A escolha da câmera para a fotografia dos retículos foi feita por tentativas.

Diversos modelos de câmeras digitais foram testados até que foi escolhida uma câmera compacta semi-profissional *Canon PowerShot G10*, com 14 megapixels e lente incorporada de 6,1 a 30,5

mm. Esta câmera foi utilizada nos primeiros ensaios com distância do objeto de 8 cm. Para permitir a aproximação da câmera do modelo, com a distância de trabalho requerida, e superar os obstáculos junto à máquina universal de ensaios, foi adquirido um tripé especial com recurso de extensão horizontal (ver Figura 3.2).

Para fazer frente às exigências dos ensaios, as limitações desta última câmera levaram à compra de um modelo profissional SLR, com lentes intercambiáveis.

Foi escolhida uma câmera EOS *Rebel* T2i (18 megapixels), com uma lente especial de MACRO EF-S 60 mm 1:2, 8 USM, com vários novos recursos. Para conhecer melhor a nova câmera e lente, foram fotografados retículos e as características encontradas foram colocadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3-Testes com a câmera CANON EOS Rebel T2i+ lente MACRO EF-S 60 mm 1:2, 8 USM

Experimento em 23.04.2010-V.Indiana							
EQUIPAMENTO UTILIZADO:							
CÂMERA Eos Rebel T2i-18 mpixels							
objeto:Retículo Clipgraph p=0,254mm ,w= 0,127mm							
iluminação fraca em ambiente interno							
nº foto	distância (cm)	dist. /grid	largura(cm)	altura(cm)	pixels inteiros	qualidade do foco	observações/operação
39	250	9843	85	57	não	não	não dá foco
41	200	7874	70	47	não	não	
43	170	6693	65	43	não	não	
44	160	6299	55	37	não	não	
45	150	5906	51	34	não	não	
46	140	5512	49	33	não	ruim	moiré na foto muito forte
47	130	5118	45	30	não	ruim	
48	120	4724	43	29	não	ruim	moiré no visor(foto g10-nº218)
49	110	4331	39	26	não	ruim	
51	100	3937	34	23	não	ruim	
52	90	3543	24	16	não	ruim	
53	80	3150	22	15	5px irregulares	regular	
54	70	2756	21	14	5-6irregulares	regular	
55	60	2362	20	13	6 irregulares	razoável	
57	50	1969	16	11	não	muito ruim	
58	40	1575	12	8	11irregulares	boa	
59	40	1575	12	8	9-10 irregulares	boa	repetição em novo local
60	30	1181	11	7	13 irregulares	boa	novo local
62	20	787	7	5	20 irregulares	ruim	novo local
63	15	591	4,5	3	28	boa	novo local
64	10	394	3,3	2,2		ruim	

Observando a tabela 3.3, constata-se que a distância de trabalho lente-objeto ótima está numa faixa de 15 a 40 cm. Nos ensaios reais a distância utilizada ficou em torno de 32 cm.

Observe que no caso de objetos maiores será necessário substituir as lentes (FORNO, BROWN, *et al.*, 1991).

Junto com a câmera vem o *software Digital Photo Professional* (DPP), com diversas ferramentas e um visor avançado em tempo real, que permite focagem automática com ampliação de imagem de até 200%, gravação de imagens em arquivo RAW e um dispositivo de disparo remoto. Estes recursos vêm de encontro às necessidades básicas deste tipo de fotografia, que são a qualidade do foco, a imobilidade da câmera e a qualidade do arquivo de gravação. A Figura 3.16 mostra o aspecto da tela do *software* DPP.



Figura 3.16-Aspecto da tela do *Digital Photo Professional* com a foto de retículo do modelo com 0,254mm de período

3.3.2.1 - Os Arquivos Tipo RAW

É um recurso existente nas modernas câmeras digitais, que permite uma maior pureza da qualidade de imagem e tem como consequência direta uma maior precisão dos dados e menor nível de ruídos. Uma foto JPEG com 18,1 Mb, com a tecnologia RAW chega a ter 52 Mb de tamanho.

3.4 - A Geração e Multiplicação das Franjas

A maneira mais simples de gerar franjas de *moiré* é superpor transparências, fotolitos ou negativos de fotografias que contenham retículos de linhas paralelas ou cruzadas. Esta geração é feita através de interferência física mecânica.

Porém, esta interferência pode ser feita por meio de computação gráfica, ou seja, por interferência digital.

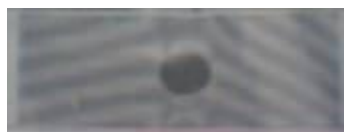
O experimento mostrado na Figura 3.17 ajudou no entendimento deste fenômeno.



(a)- Franjas de deslocamento do campo u-
(foto da *webcam*).



(b)- Franjas de deslocamento do campo u-
(gerada no computador).



(c)- Franjas de deslocamento do campo v-
(foto da *webcam*).



(d)- Franjas de deslocamento do campo v-
(gerada no computador)



(e)- Franjas de deslocamento do campo u
multiplicadas por 4x-multiplicação digital de franjas no
programa *MAS*.

Figura 3.17-Comparação entre as franjas formadas fisicamente e virtualmente. Passo do retículo = 0,20 mm.

Como se pode observar na Figura 3.17, as franjas físicas são idênticas às franjas digitais.

Porém, para multiplicar as franjas físicas, haveria necessidade de fazer um deslocamento físico do retículo de referência com $\frac{1}{4}$ do período do mesmo, e adquirir 4 imagens de interferogramas formados opticamente para utilizar a rotina do *software MAS* intitulada ODFM (multiplicação óptico-digital de franjas), tratada no item 2.4.7.1.

Fazer deslocamentos físicos igualmente espaçados, do retículo de referência, com dimensão de 0,05 mm, ou menos, com absoluta precisão é uma tarefa que requer um aparato mecânico micrométrico caro e complicado.

Por outro lado, ao capturar a imagem digital do retículo, podem-se fazer os deslocamentos do retículo de referência utilizando *softwares* gráficos de forma simples, barata e com precisão e

exatidão, limitados unicamente por ruídos de origens diversas e limitações do sistema óptico de aquisição de imagem. De qualquer maneira, as vantagens são muitas.

Como toda multiplicação é feita de forma digital, denominou-se este método de DFM (multiplicação digital de franjas), ou seja, uma versão digital do O/DFM.

A Figura 3.18 mostra os deslocamentos sofridos pela imagem do círculo e as correspondentes franjas de interferência.



Figura 3.18-Franjas de interferência digital de imagens devido a um deslocamento simulado por computação gráfica; (fotos com câmera digital Sony Cybershot DSC-S500 (6.0 megapixels); retículo em fotolito a *laser* HE-Ar com período 0,127 mm).

Para antever o resultado de multiplicações obtidas por semi-subdivisões sucessivas pelo método DFM, para o retículo com 0,254 mm de período e sem rotação de retículos, construiu-se a tabela 3.4. Observa-se que a partir da 8ª iteração ($\beta = 256$) para o retículo com $g = 0,254$ mm, ou a partir da 7ª iteração ($\beta = 128$) para o retículo com $g = 0,127$ mm, é alcançada a sensibilidade de aproximadamente 1 μ m por ordem de franja. Este cálculo foi feito sem considerar o eventual aumento de resolução devido às lentes da câmera.

A sensibilidade de 1 μ m por ordem de franja significa que deslocamentos micrométricos já podem ser captados, e isto corresponde a medição de deformações de 10 μ em base de 100 mm, e eleva o método à condição de instrumento de extensometria, podendo ser utilizado em aplicações correntes em laboratórios de estruturas. Para efeito de comparação, lembra-se que os extensômetros elétricos usuais, de uma maneira geral, apresentam variação de 10 μ por °C (ANDOLFATO, CAMACHO e BRITO, 2004).

Para contemplar as iterações mostradas na tabela 3.4, foram desenvolvidas pelo autor as sub-rotinas MULTIFRAN descritas no apêndice 2, para fazer a multiplicação de franjas para β_8 , β_{16} , β_{32} , β_{64} e β_{128} . A rotina MULTIFRAN para β_{128} necessita de processamento de 64 bits.

Tabela 3.4-Multiplicação de franjas para o retículo com $g = 0,254\text{mm}$ ($f=3,94$ linhas por mm)

iterações	β	$\mu\text{m}/N$	nm/N	linhas/mm	$\varepsilon(\mu)/100\text{mm}$	$\varepsilon(\mu)/50\text{mm}$
1	2	127		7,9	(*)1272	2546
2	4	63,500		15,7	(**)635	(*)1272
3	8	31,750		31,5	(***)318	(**)635
4	16	15,875		63,0	159	(***)318
5	32	7,938		126,0	79	159
6	64	3,969		252,0	40	79
7	128	1,984		503,9	20	40
8	256	0,992	992	1007,9	10	20
9	512	0,496	496	2015,7	5	10
10	1024	0,248	248	4031,5	2	5
11	2048	0,124	124	8063,0	1	2
12	4096	0,062	62	16126,0	1	1
13	8192	0,031	31	32252,0	0	1
14	16384	0,016	16	64503,9	0	0
15	32768	0,008	8	129007,9	0	0
16	65536	0,004	4	258015,7	0	0
17	131072	0,002	2	516031,5	0	0
18	262144	0,001	1	1032063,0	0	

Início do escoamento do aço doce

1/2 do início do escoamento do aço doce

1/4 do início do escoamento do aço doce

N=ordem de franja

(*)

(**)

(***)

Pelo exposto em 2.4.7.1, o limite de iterações depende do tamanho da escala de cinza utilizada. Neste sistema de 8 bits, existem 256 níveis de cinza e este fato explica porque o limite máximo de iterações foram 7, correspondendo a $\beta_{limite} = 128$.

3.4.1 - O Efeito da Distorção da Lente na Geração das Franjas

Considere as imagens originais do retículo carregado (a)_d e do retículo descarregado (b)_d, ambas distorcidas pela lente da câmera, e as correspondentes imagens (a) e (b) sem a distorção de lente (removida pelo software GIMP).

Seja:

$$(a)_d + (b)_d = I_d \quad \text{e} \quad (a) + (b) = I$$

Os interferogramas I_d e I contêm as franjas que determinam os deslocamentos havidos.

Feito este experimento, constatou-se visualmente que I é idêntico a I_d .

Este experimento comprovou que as distorções relativas das imagens se anulam, e as franjas resultantes permanecem idênticas.

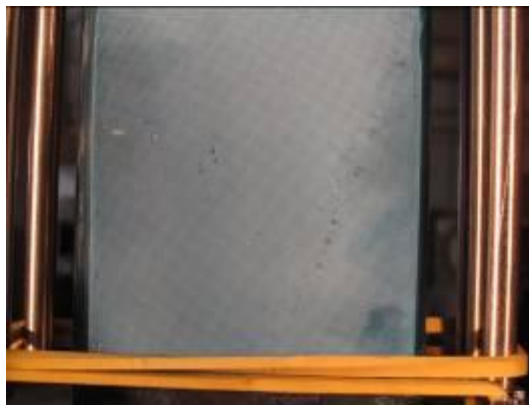


Foto original $(b)_d$ do corpo descarregado
No centro a imagem do CP01 parece mais larga do que nas bordas.

Figura 3.19 - Distorção esférica devido à lente da câmera.

Este fato confere com os relatos da bibliografia consultada, de que, na técnica da dupla exposição, a distorção da lente não afeta a geração das franjas.

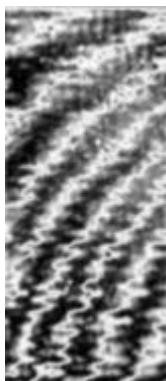
3.4.2 - O Efeito da Orientação das Linhas dos Retículos na Geração Digital das Franjas Obtidas Após a Multiplicação

No item 2.4.6 foi descrita a utilização de retículos de linhas paralelas para obter franjas que representam o deslocamento havido na direção normal às linhas dos retículos de referência.

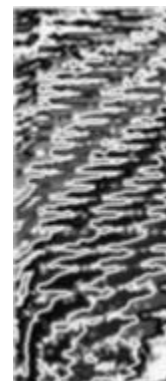
Neste trabalho, foram utilizados as imagens de retículos em cruz, de referência e do modelo. Uma questão a considerar é, como separar a que direção de deslocamento referem-se as franjas obtidas, no caso de retículos em cruz?

Para responder a esta questão, foi feita uma comparação entre as franjas geradas digitalmente por associação de um retículo de linhas paralelas com um retículo em cruz por dois retículos em cruz. Em ambos os casos houve multiplicação, na direção de y , para $\beta=16$.

Os resultados mostram que, após sucessivos deslocamentos na direção y, as franjas que representam os deslocamentos na direção x, ficam muito menos densas do que as da direção y, e podem ser removidas por filtros. A Figura 3.20 (a) mostra que as franjas formadas pelos dois retículos em cruz têm uma definição de imagem melhor, mais homogênea e densa do que a correspondente ao retículo de linhas paralelas, mostrada na Figura 3.20 (b).



(a) Interferograma digital gerado pelas imagens de dois retículos em cruz



(b) Interferograma digital gerado pelas imagens de um retículo horizontal de linhas paralelas e um retículo em cruz.

Figura 3.20- Interferogramas de deslocamento na direção y, multiplicados por DFM, com $\beta=16$, gerados com retículos de referência em cruz, e de linhas paralelas.

3.4.3 - TMGD com Rotação Relativa dos Retículos

A rotação relativa dos retículos pode aumentar o número de franjas em até 5 vezes (para $\theta < 3^\circ$), mas isto não aumenta a sensibilidade de medição, porque a inclinação das franjas compensa este efeito e permite diferenciar se a deformação é de alongamento ou de encurtamento (ver Figura 2.28 e 3.21).

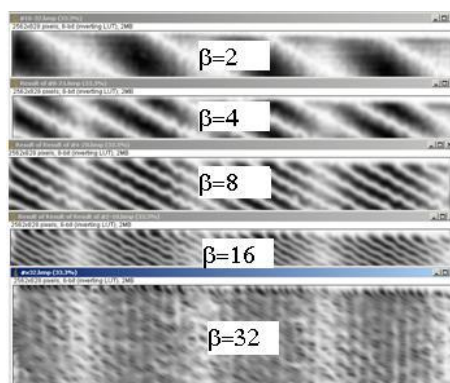


Figura 3.21 - Multiplicação de franjas com rotação de retículos ($\theta = 1^\circ$) e $\beta = 2, 4, 8, 16$ e 32 . Observar que a resolução das franjas na tela do programa MAS é bem definida até $\beta = 16$.

3.4.4 - Multiplicação de Franjas por 8, 16, 32, 64 e 128 Vezes pela Rotina MULTIFRAN

A aplicação da TMGD para multiplicação de franjas por 8, 16, 32, 64 e 128 vezes, é feita pela rotina macro do programa *IMAGE J* criada pelo autor, denominada MULTIFRAN.

As rotinas MULTIFRAN são baseadas em uma extensão dos procedimentos apresentados nos itens 3.7.1.1 e 3.7.1.3 e estão listadas no apêndice.

Para alimentação dos dados de entrada, são necessárias as duas imagens *Iop.bmp* e *Iop scaled.bmp* em 8 bits e as seguintes informações:

- identificação do corpo-de-prova;
- dados de carga ou deformação;
- passo do retículo em pixels;
- direção do campo de deslocamento (x,y);
- ângulo θ de rotação relativa entre as duas imagens de entrada.

A saída da rotina Multifran fornece as franjas multiplicadas pelo fator β , rotacionada de θ , na direção escolhida, e também as quatro imagens de fase deslocada correspondentes à antepenúltima etapa.

É especialmente muito importante a utilização destas quatro imagens da antepenúltima etapa para fazer a entrada de dados no programa *MAS*, para utilizar os recursos de filtragem avançada e fazer a análise final.

3.4.5 - A Filtragem Avançada do Programa *Moiré Analysis Software* (MAS)

O programa *MAS* possui várias ferramentas entre as quais dois filtros avançados especialmente poderosos: *Self Adaptive Filter* e o *Phase –Shift Filtering*. Ver Figura 3.22.

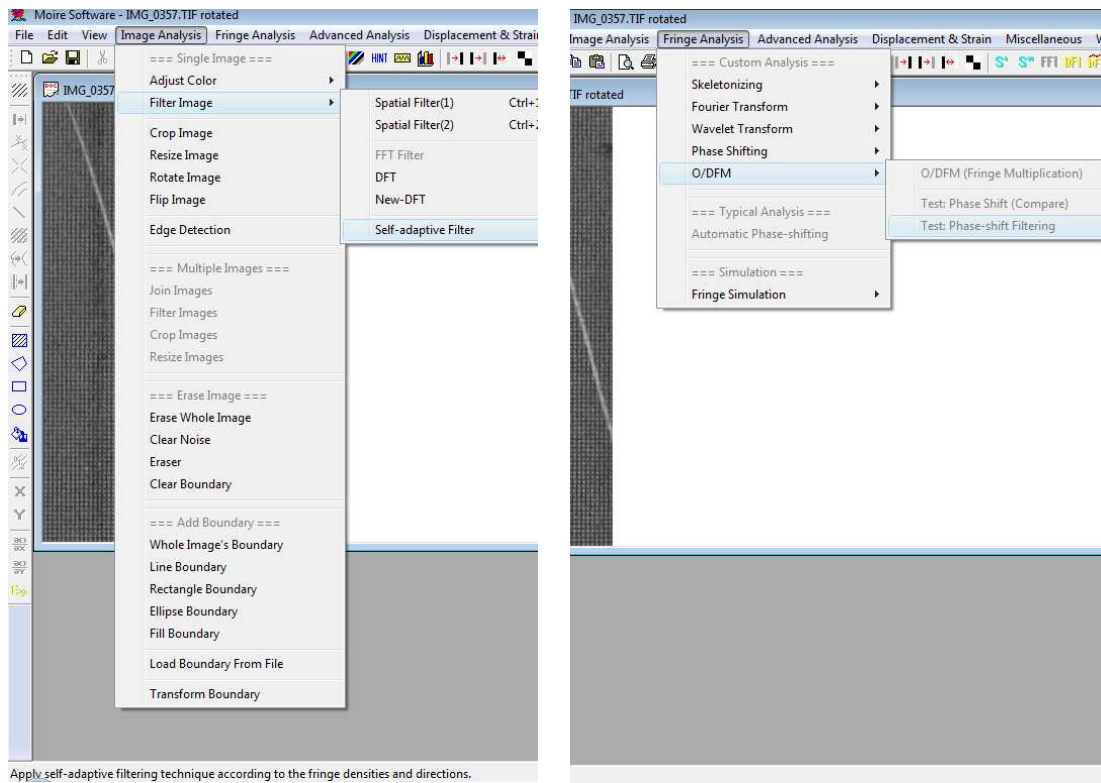


Figura 3.22-As telas dos filtros “Self - Adaptive Filter” e “Phase – Shift Filtering”.

O *Self-Adaptive Filter* trabalha interagindo em função das densidades e direção das franjas, e o *Phase-Shift Filtering* interage com as quatro imagens de fases deslocadas.

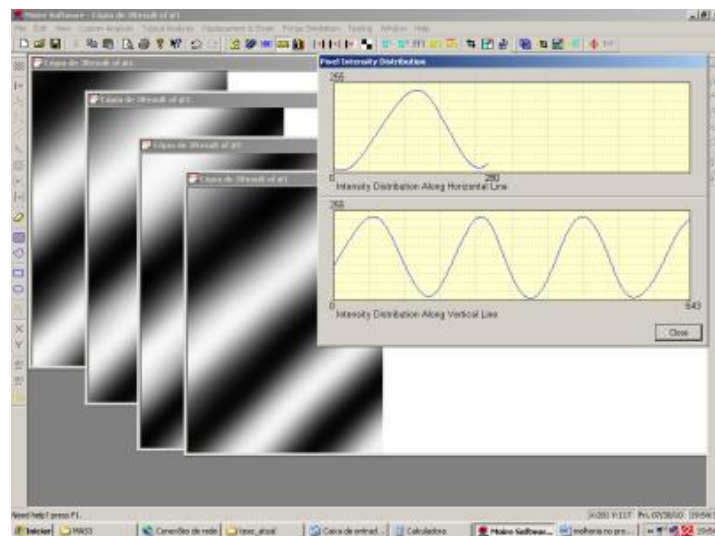


Figura 3.23-Resultados da aplicação dos filtros “Self adaptive Filter” e “Phase-shift Filtering”.

O efeito deste conjunto de filtros avançados sobre as ondas de intensidades pode ser observado na Figura 3.23 e revela-se um excelente recurso.

A descrição completa do programa e dos algoritmos dos filtros é encontrada em http://faculty.cua.edu/wangz/software_moire.htm

3.5 - Descrição Geral da Extração, Tratamento e Análise dos Resultados

A obtenção digital de franjas é feita a partir das imagens do modelo no estado inicial (retículo de referência) e do modelo no estado deformado (retículo do modelo).

As fotos digitais obtidas inicialmente em formato RAW são convertidas para arquivos de extensão bmp de 8 bits, e podem ser processadas por *softwares* gráficos. No presente trabalho foram utilizados os *softwares* *IMAGE J* e *Moiré Analysis Software (MAS)*.

As imagens das franjas são denominadas interferogramas e são resultantes da interferência digital de imagens por adição.

A primeira fase de tratamento de imagem consiste em aplicação de filtros para remoção das linhas do retículo que não interessam para o cálculo.

A multiplicação das franjas é obtida pela versão digital do algoritmo de cálculo do método ODFM apresentado no item 2.4.6.1.

3.5.1 - Determinação da Escala da Imagem

Para dar entrada na rotina MULTIFRAN, e no *Moiré Analysis Software (MAS)* é necessário informar o fator de escala entre os pixels das imagens e o tamanho real do modelo em mm.

Uma forma de fazer isto é contar o número de períodos de retículo em um determinado comprimento da imagem, determinar o número de pixels deste intervalo, e multiplicar o número de períodos contados pelo passo do retículo em milímetros.

O resultado deste procedimento fornecerá a proporção existente entre o comprimento real da imagem em milímetros e o seu correspondente número de pixels na imagem em proporção 1x1.

Este procedimento será pormenorizado no item 3.8.1.

Ver Figura 3.24.

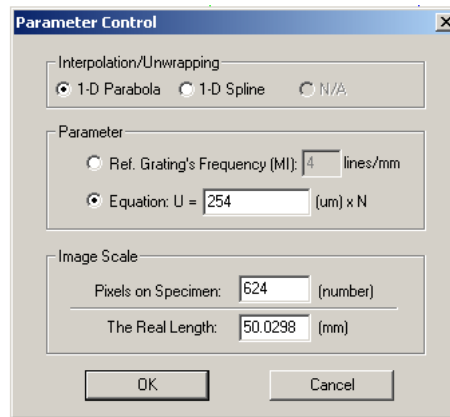


Figura 3.24 - Parâmetros de controle da equação do campo de deslocamento e do fator de escala imagem versus modelo.

Fonte: programa *Moiré Analysis Software (MAS)*.

3.6 - O Arranjo Experimental

3.6.1 – Iluminação

Foi utilizada uma luminária com lâmpada circular alógena com 15 W de potência, e 16 cm de diâmetro, com o objetivo uniformizar e manter ortogonal a intensidade luminosa no plano do modelo X, Y (ver Figura 3.25).

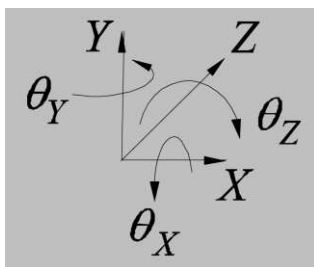


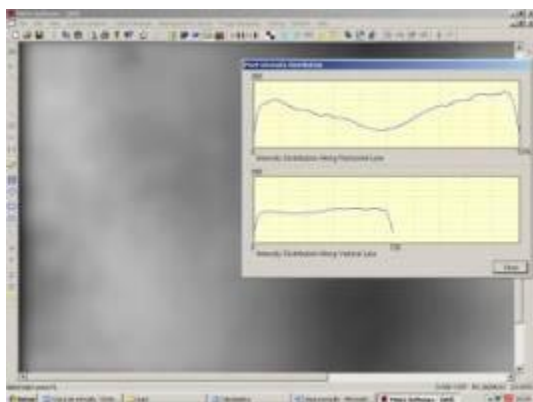
Figura 3.25 - Luminária com lâmpada alógena circular adaptada para uniformizar e ortogonalizar as intensidades luminosas.

A distância mínima da luminária ao objeto foi de cerca de 10 cm, para respeitar a inclinação de 45° máxima do feixe luminoso da luminária ao objeto.

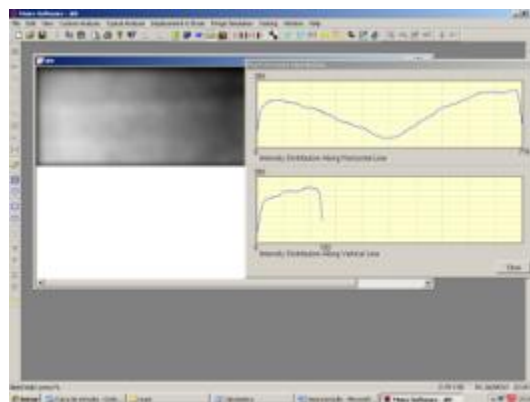
O ambiente do ensaio deve ser completamente escurecido para evitar a mistura de fontes de luz de origens diversas, e a região de contorno vizinha ao corpo-de-prova foi provida de um fundo preto opaco para evitar reflexos de luz indesejáveis.

O diagrama de intensidades luminosas foi obtido no *software Moiré Analysis Software (MAS)*. Para medição de intensidades a assessoria de um fotômetro teria sido muito útil.

As Figuras 3.26 e 3.27 mostram a importância da distribuição da luz na formação da curva de intensidades de *moiré*, e eficiência da iluminação circular.

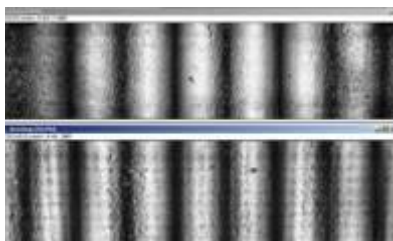


(a) imagem do diagrama inferior com iluminação circular, praticamente uniformizada;



(b) imagem do diagrama inferior com forte concentração de luminosidade na parte superior direita.

Figura 3.26 – Influência da distribuição de luminosidade na formação da curva de intensidades de *moiré*.



Notar o desaparecimento dos ruídos junto às bordas extremas verticais da imagem inferior, devido a melhor distribuição de intensidade luminosa.

Figura 3.27-Influência da distribuição de intensidade luminosa na formação de ruídos.

3.6.2 - Nivelamento Horizontal da Câmera

O nível de bolha de dois eixos encaixado no nicho do *flash* da câmera (Figura 3.2) compensa as deformações do trilho de foco milimétrico, entre outras, e permite um melhor nivelamento horizontal da câmera.

3.6.3 - Posicionamento da câmera em relação ao eixo z do modelo

Considere os eixos x , y como uma referência fixa no plano do modelo e o eixo z ortogonal a este plano (ver Figura 3.29).

O posicionamento da câmera em relação ao eixo z é feito em primeira instância observando o nível de bolha sobre a câmera.

Em determinadas distâncias lente-objeto, um padrão *moiré* em tempo real é formado, mais ou menos intenso, por interferência do retículo do modelo com o *grid* interno do sensor da câmera digital, ou do monitor do *notebook* mostrado na Figura 3.28.

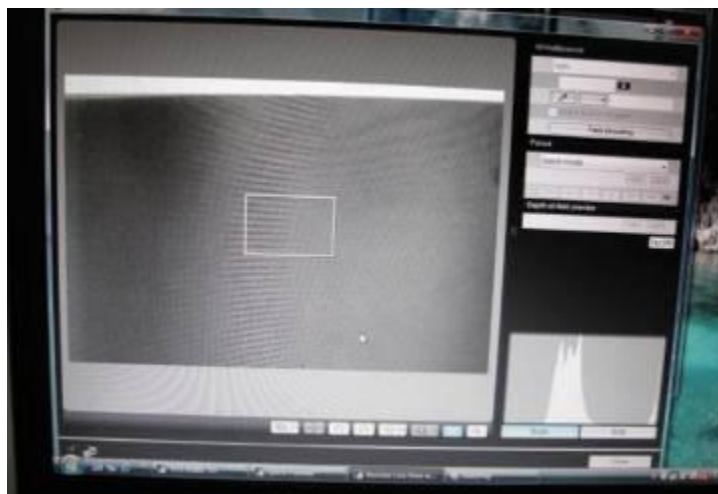


Figura 3.28 – Efeito *moiré*, com franjas curvas, gerado por interferência entre o retículo do modelo e o *grid* do monitor do *notebook*.

Porém, sem uma lente condensadora como a utilizada no aparato mostrado na Figura 2.41, esta interferência é formada com distorção óptica, pois a imagem do *grid* do sensor da câmera é plana e a imagem do retículo foi distorcida através da lente da câmera, formando franjas curvas.

Para alinhamento relativo dos dois retículos antes do disparo, a opção foi usar a simetria da formação das franjas como um referencial para a rotação do eixo da cabeça do tripé em torno do eixo z (fora do plano).

Para conferir o resultado do alinhamento relativo entre os retículos após o disparo, é possível observar nas fotos a inclinação do efeito *moiré* secundário em vários níveis de zoom. A correção é feita por tentativas rotacionando as imagens por um *software* gráfico.

3.6.4 - Posicionamento da Câmera em Relação ao Eixo x e y do Modelo

A observação da simetria do contraste das franjas do item anterior auxilia no posicionamento relativo em relação ao eixo y. Este posicionamento tem sido feito por medição geométrica, não muito precisa. E o posicionamento da câmera em relação ao eixo x é auxiliado pelo nível de bolha sobre a câmera. Ver Figura 3.2.

3.6.5 - Posicionamento do Modelo na Máquina de Ensaios

No caso de tração uniaxial, os mecanismos de suporte da máquina de ensaios direcionam a colocação do modelo na direção x e y. A direção do plano do modelo normal ao eixo z deve ser encontrada por meio de um prumo.

O ideal é utilizar um alinhador *laser* para garantir a ortogonalidade do eixo óptico da câmera com o plano do modelo, nos moldes daquele mostrado na Figura 2.42.

3.6.6 - A Estabilidade da Câmera

Estabilização da câmera é recomendada pela bibliografia como um item de fundamental importância, para eliminar os movimentos involuntários e os erros decorrentes destes.

O pré-requisito para a escolha da câmera passa pela existência de recursos de disparo remoto.

O tripé com trilho de foco além de facilitar o posicionamento relativo da câmera (Figura 3.2), estabiliza o disparo. Porém, constatou-se que este tripé e trilho de foco são muito leves e flexíveis, e que o ideal é usar um tripé pesado.

Cloud (1998) relata o uso de cantoneiras de ferro e blocos de chumbo para dar peso e estabilidade à câmera.

Um recurso de estabilização foi incluído na câmera *CANON Rebel T2i*, e quando ele é acionado produz um travamento dos espelhos internos da câmera.

3.6.7 - A Estabilidade do Modelo

A fixação de guias verticais de aço junto ao modelo foi a opção encontrada por Schwarz (1987) para estabilizá-lo.

Xavier (2007) acoplou um LVDT ao modelo para medir os movimentos fora do plano (da ordem de dezenas de micrômetros).

Nos ensaios desta tese os modelos não foram estabilizados.

3.7- A Calibração da TMGD com *Strain-gages*

Como demonstrado ao longo do texto, a aplicação da TMGD está sujeita a erros experimentais, aleatórios ou sistemáticos, de naturezas diversas.

Por outro lado, existem parâmetros, tais como o fator de magnificação das lentes e o efeito de reforço do modelo pelo retículo, que necessitam ser ajustados de maneira global.

Felizmente o programa *Moiré Analysis Software* possui uma interface que permite a alimentação de dados referentes às frequências ou equações das ordens das franjas associadas ao período do retículo, conforme mostrado na Figura 3.24.

A possibilidade de alterar estas equações a partir da tela de parâmetros de controle do *software* MAS permite encontrar, por análise inversa, um fator de calibração, a partir do conhecimento da deformação exata em um ou mais pontos do modelo.

A colagem de extensômetros elétricos (*strain-gages*) no modelo para determinação pontual da deformação tem sido utilizada correntemente pelos laboratórios de estruturas (ASSIS, 2007).

O método híbrido adotado a partir de utilização conjunta dos *strain-gages* com a TMGD permite aliar a confiabilidade dos primeiros com a habilidade de medir em campo inteiro do segundo.

As vantagens decorrentes da utilização deste sistema são notórias.

3.8 - Ensaios Virtuais com a Técnica de *Moiré* Geométrico Digital (TMGD)

3.8.1 – Objetivos

Aplicar, por *software*, uma deformação conhecida na imagem do retículo, e comparar o seu valor com aquele obtido aplicando-se a técnica de *moiré* geométrico digital (TMGD), para efeito de verificação da eficácia desta técnica.

3.8.2 – Equipamentos Utilizados

- *Notebook* conectado à câmera com o *software Digital Photo Professional* instalado.
- Câmera *CANON OS Rebel 2Ti* + lente MACRO EF-S 60 mm 1:2, 8 USM .
- Nível de bolha 2 eixos na sapata do *flash* da câmera.
- Trilho de foco milimétrico.
- Tripé da Manfrotto, com eixo horizontal.
- Iluminação:
 - 2 Lâmpadas fluorescentes compactas de 15w no Arranjo 1.
 - 1 lâmpada alógena circular de 18 cm de diâmetro no Arranjo 2(ver Figura 3.25),

3.8.3 – Arranjos Utilizados

No Arranjo 1 (Figura 3.29) os objetos com os retículos foram posicionados sobre uma superfície plana horizontal e foram iluminados com duas lâmpadas fluorescentes.

No Arranjo 2 (Figura 3.30 e Figura 3.2.5) os objetos com os retículos já gravados no modelo de aço doce foram posicionados na posição vertical e foram iluminados com lâmpada alógena circular. Foi providenciado um fundo preto em torno do modelo para evitar a má distribuição da iluminação devido a reflexos indiretos de luz.

Convém lembrar que a superfície do plástico *mylar* é especular, e a superfície do modelo é difusa, e que estes dois tipos de superfície tem comportamentos muito diferentes, como foi mostrado em 2.4.8.6.

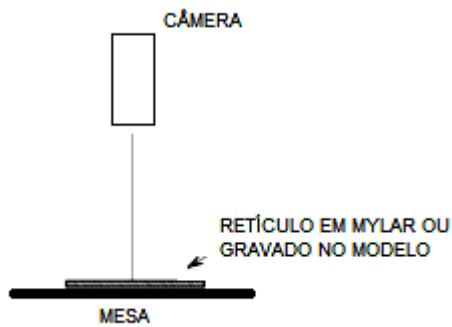


Figura 3.29 - Arranjo 1.

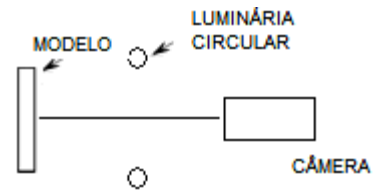


Figura 3.30 - Arranjo 2.

3.8.4 – Outros Dados dos Ensaios

- Retículo em cruz com período de 0,254 mm, e espessura de linha de 0,127 mm, plotado com *laser* He-Ne em filme *mylar*.
- Distância do objeto à lente: 46,5cm
- Verificação da ortogonalidade da foto em relação ao plano do retículo:

O nível do plano do retículo x, y foi verificado por um nível de bolha.

Eixo z: pelo ajuste do nível de bolha da sapata do *flash*.

Eixo x: pelo ajuste do nível de bolha do tripé.

Eixo y: pela simetria nas franjas de *moiré* formadas com o retículo da câmara. Ver Figura 3.28.

É oportuno observar que o *Setup* configurado para a resolução da foto foi de 8000 dpi, para compatibilizar-lo com a resolução da fotoploter que imprimiu o retículo.

3.8.5- Ensaio EV01 - Aplicação da TMGD (Arranjo 1)

3.8.5.1 - Preparação das Imagens

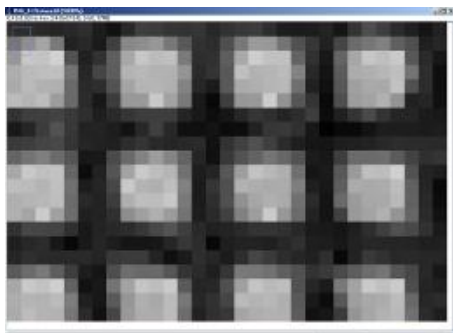


Figura 3.31- Ampliação da IMG 128.TIF; Retículo em cruz em *mylar* ; g = 0,254mm; d = 46,5cm; zoom 3200%; 7,92 pixels/periódodo

Tabela 3.5 - Dados da IMG 128.TIF

Nombre de archivo	IMG_0128.TIF	Ajustes de parámetros	Curva de tono	Estándar
Modelo de cámara	Canon EOS REBEL T2i	Nitidez	3	
Firmware	Firmware Version 1.0.6	Contraste	0	
Hora y fecha de disparo	27/1/2010 22:20:31	Estilo foto	Estándar	
Modo de disparo	Macro (Primer plano)	Nitidez	3	
Tv (Velocidad de obturación)	1/50	Contraste	0	
Av (Valor de abertura)	4.0	Saturación	0	
Modo de medición	Medición evaluativa	Ton. color	0	
Compensación de la exposición	0	Espacio de color	sRGB v1.31 (Canon)	
Velocidad ISO	3200	Reducción de ruido en largas exposiciones	0: Off	
Objetivo	EF-S60mm f/2.8 Macro USM	Reducción de ruido de alta sensibilidad ISO	0: Estándar	
Distancia focal	60.0 mm	Prioridad a tonos de altas luces	0: Desactivada	
Tamaño de la imagen	5184x3456	Corrección iluminación periférica	Activar	
Flash	Desactivar	Tamaño de archivo	52648KB	
Modo Balance de blancos	Automático	Modo de transporte de película	Disparo	de
Modo AF	Enfoque manual		fotograma único	

O arquivo RAW IMG_128.cr2 foi convertido para IMG_128.TIF com 8 bits, no *software Digital Photo Professional versão 3.8*.

A Img 128.tif foi medida no *software* Image Tools, e para a altura do retículo de 127,127 mm foram encontrados 3964 pixels, o que equivale a 31,181 pixels/mm, ou 7,920 pixels/período. Para reduzir ruídos, as bordas da imagem foram cortadas arbitrariamente no *software IMAGE J*, obtendo-se a imagem I_0 em tons de cinza com 1560x1560 pixels, ou seja, 50,030 x 50,030 mm.

3.8.5.2- Cálculos Analíticos para Duas Franjas Exatas

Para se obter a geração de duas franjas exatas para servir de referência, calcula-se o deslocamento uniaxial de alongamento em x dado à imagem.

O espaço entre franjas:

$$\delta = \frac{50,030}{2} = 25,015 \text{ mm}$$

A deformação aplicada:

$$\varepsilon = \frac{g}{\delta - g} = \frac{0,254}{(25,015 - 0,254)} = 10258,109\mu$$

O deslocamento a ser aplicado:

$$\Delta x = \varepsilon \times \ell_0 = 10258,109 \times 50,030 = 0,513 \text{ mm}$$

3.8.5.3 - Geração da Imagem Deformada I_0 scaled

A imagem I_0 será deformada utilizando-se do comando TJ *scale*, aplicados a I_0 , e conforme cálculos anteriores:

$$\text{Fator de escala} = \frac{\Delta_x + \ell_0}{\ell_0} = \frac{0,513 + 50,030}{50,030} = 1,010$$

Digitando-se este número no comando *TJ scale*, obtêm-se a imagem $I_{0scaled}$.

3.8.5.4- Rotina da Aplicação da TMGD no Ensaio EV01

A tabela 3,6 mostra detalhadamente a sequência dos procedimentos necessários para aplicação da TMGD sem multiplicação de franjas.

Ainda no *software IMAGE J*, para efetuar a medição é necessário adicionar as imagens do corpo indeformado (I_0) e deformado ($I_{0scaled}$) para gerar as imagens das franjas de interferência (interferograma). Para que o processamento prossiga, é necessário tratamento de imagem para eliminar as linhas do retículo que não entram na análise, por meio de filtros.

Tabela 3.6-Rotina de processamento para a medição pela Técnica de *Moiré* Geométrico Digital

Processamento no <i>software IMAGE J</i>	
(a) Em Process/Image Calculator adiciona-se I_0 com $I_{0scaled}$, com 32 bits, e obtém-se $I_{0result}$.	(b) Com $I_{0result}$ em process/filters, aplica-se o filtro gaussian blur, com sigma radius 2.
(c) Com $I_{0result}$ em process/Find edges.	(d) Em image/type/8bits converte-se $I_{0result}$ em tons de cinza de 8bits e o salva como #0.BMP.
Processamento no <i>Moiré Analysis Software (MAS)</i>	
(e) Em tools/ settings options/, configurar os dados de escala da imagem e do período do retículo.	(f) Após a abertura de #0.BMP em Custom Analysis/Image Processing General/Single image/Resize Image/, digitar 40%.
(g) Em Custom Analysis/Image Processing General/Single image/Filter Image/New FFT, com Display Amplifier (5), use transformation center as filter center ,Windows Size Value (5).	(h) Custom Analysis/Image Processing General/Single Image/Adjust Color/Enhance Contrast.
(i) Custom Analysis/Image Processing General/Single Image/Adjust Color/Make Lighter (M).	(j) Custom Analysis/Fringe Processing: Skeleton/ Binarize.
(k) Custom Analysis/Fringe Processing: Skeleton/Fringing Tinning 1.	(l) Custom Analysis/Fringe Processing: Skeleton / Fringing Repair fringe.
(m) Custom Analysis/Fringe Processing: Skeleton/find Fringe.	(n) Custom Analysis/Fringe Processing: Skeleton/ Clear Fringe noise.
(o) Custom Analysis/Fringe Processing: Skeleton/Smooth Center Lines; polynomial order 1.	(p) Custom Analysis/Fringe Processing: Skeleton/Track Fringe Order.
(q) Custom Analysis/Image Processing Special/Add Boundary/Whole's Image Boundary.	r) Displacements & Strains/Obtain displacements/from Fringe Skeleton Map/Obtain Displacement/Strain along a Line.

A seguir, o interferograma obtido é convertido para arquivo de 8 bits com extensão.BMP, e os dados são transferidos para o *software Moiré Analysis Software (MAS)* que é um *software* para análise de franjas. No *MAS* será feito o refinamento das franjas, a atribuição das ordens de franjas, e a extração dos resultados de deslocamentos e deformações.



Figura 3.32 A- Interferograma #0; notar que aparecem as duas franjas verticais previstas nos cálculos.

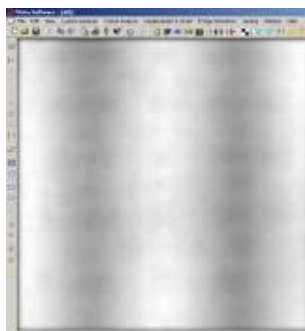


Figura 3.32 B- Interferograma #0 após o filtro New FFT.

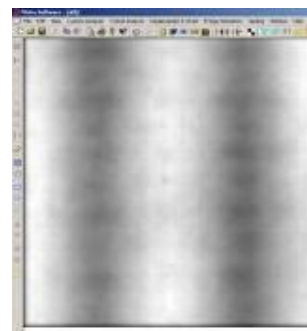


Figura 3.32 C- Interferograma #0 após o passo (h) realce de contraste.

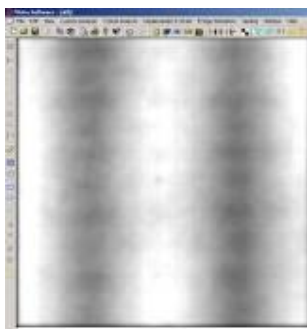


Figura 3.32 D- Interferograma #0 após o passo (i) mais luz.

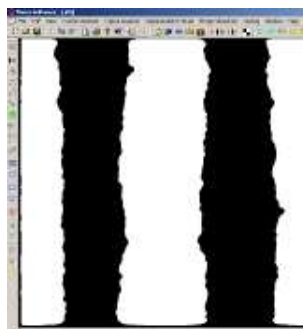


Figura 3.32 E Interferograma #0 após o passo (j) transformar em binário.

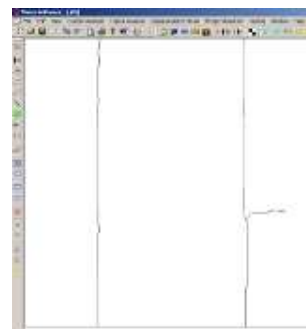


Figura 3.32 F- Interferograma #0 após o passo (k) refinar as franjas 1.

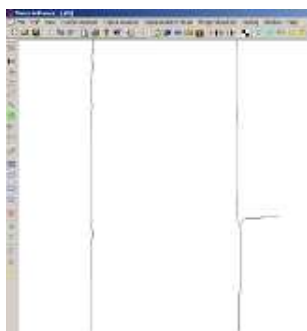


Figura 3.32 G- Interferograma #0 após o passo (l) reparar franjas.

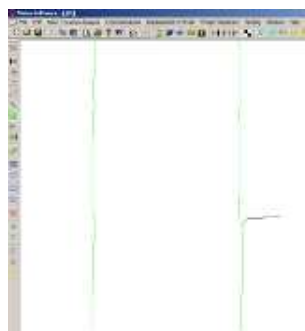


Figura 3.32 H- Interferograma #0 após o passo (m) marcar franjas.

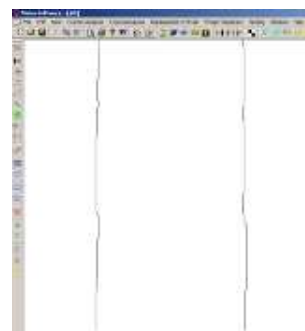


Figura 3.32 I- Interferograma #0 após o passo (n) limpar ruídos.



Figura 3.32 J- Interferograma #0 após o passo (o) suavizar linhas.

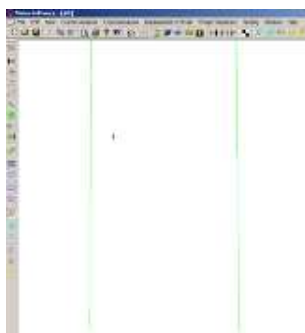


Figura 3.32 K- Interferograma #0 após o passo (p) atribuir ordem das franjas- (ao passar o cursor sobre a franja aparece a sua ordem).

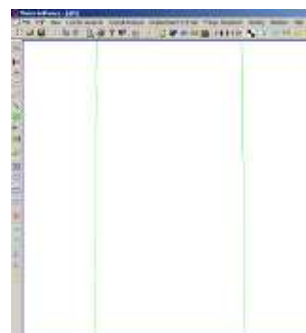


Figura 3.32 L- Interferograma #0 após o passo (q) definir contorno (todo).

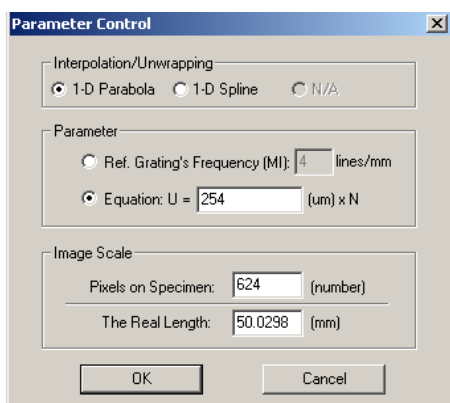


Figura 3.32 M- Interferograma #0 após o passo (r) obter deslocamentos e deformação ao longo de uma linha. (para escala de 40%: $1560 \times 0,4 = 624$ pixels).

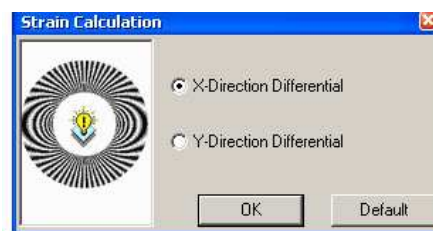


Figura 3.32 N- Interferograma #0 após o passo (r) após passar o mouse na horizontal aparece a tela pedindo confirmação da direção (neste caso x).

3.8.5.5- Resultados da Aplicação da TMGD no Ensaio EV01

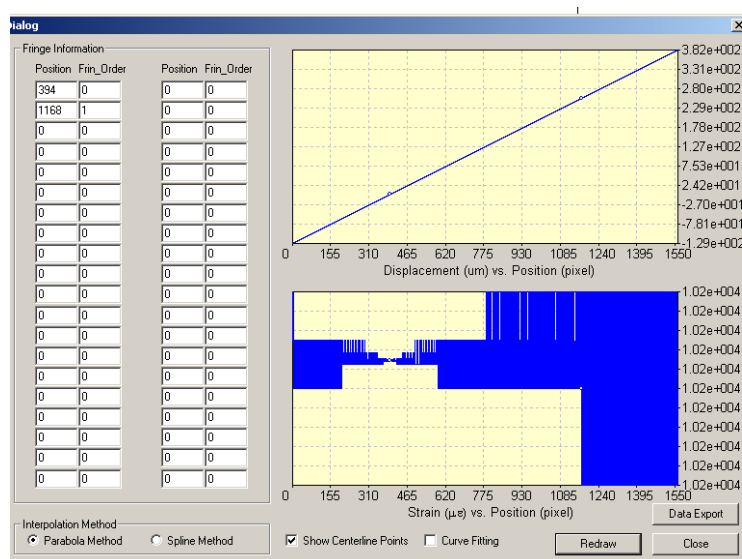


Figura 3.33 – Tela de Resultados de deslocamentos e deformações segundo uma linha média horizontal.
Fonte: Programa MAS

Tabela 3.7- Resultados dos deslocamentos Δ_x e deformação específica ε para o EV01

Cálculo analítico		TMGD		Desvio (%)	
Δ_x (μm)	ε (μ)	Δ_x (μm)	ε (μ)	u_{max}	ε
513	10258	511	10200	0,39	0,60

3.8.5.6 – Aplicação do Método DFM para Multiplicação das Franjas do Ensaio EV01 por Dois

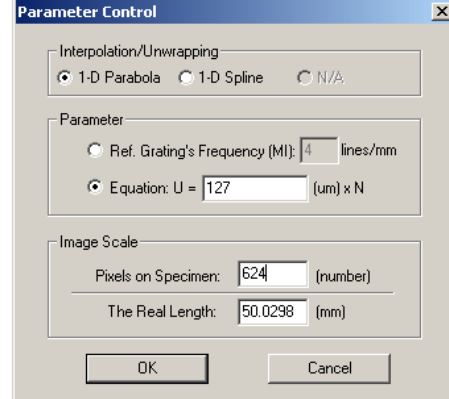
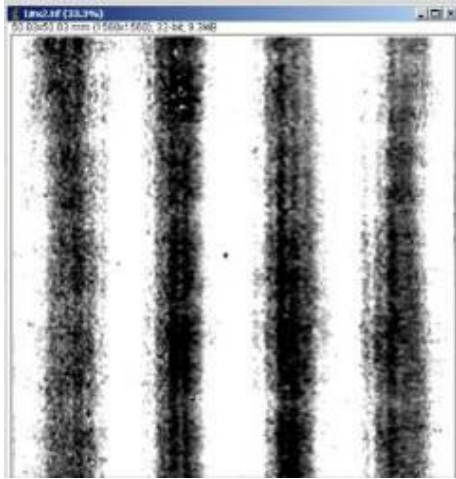
O processamento completo para análise de franjas e obtenção dos deslocamentos e deformações é análogo ao descrito em 3.8.5.4.

Uma vez obtido o interferograma #0_{IJ}.TIF do item anterior, conforme passo (d), executam-se os passos (s) e (t) e obtêm-se o interferograma #1_{IJ}.TIF.

Executando-se o passo (u) e (v) obtêm-se #x2.BMP, com as franjas multiplicadas por 2.

Tabela 3.8 - Rotina de processamento para a medição pela Técnica de *Moiré* Geométrico Digital para $\beta = 2$

Processamento no <i>software</i> IMAGE J	
(a) Em Process/Image Calculator adiciona-se I ₀ com I _{0scaled} , com 32 bits e obtêm-se I _{0result} .	(b) Com I _{0result} , em process/filters/ aplica-se o filtro gaussian blur, com sigma radius 2.
(c) Com I _{0result} em process/Find edges.	(d) Em image/type/8bits converte-se I _{0result} em tons de cinza de 8 bits e salva-se como #0 _{IJ} .TIF.
(s) Em Transform J/TJ shift desloca-se I ₀ de 1/2g obtendo-se I _{0shifted 0.5g} .	(t) Em Process/Image Calculator adiciona-se I _{0shifted 0.5g} .TIF com I _{0scaled} .TIF, com 32 bits e obtêm-se #1 _{IJ} .TIF.
(u) Em Process/Image Calculator adiciona-se #0 _{IJ} .TIF com #1 _{IJ} .TIF, com 32 bits e obtêm-se #x2.TIF.	(v) Salva-se I#x2.TIF como arquivo.BMP.
Processamento no <i>Moiré Analysis Software</i> (MAS)	
(e) Em tools/settings options/configurar os dados de escala da imagem e do período do retículo. <i>*Neste caso substitui-se g por g/β = g/2</i>	Demais passos permanecem idênticos ao item anterior substituindo-se #0.BMP por I#x2.BMP.



3.8.5.6.1 – Resultados da Multiplicação das Franjas do Ensaio EV01 por Dois

O resumo dos resultados é apresentado na tabela 3.9.

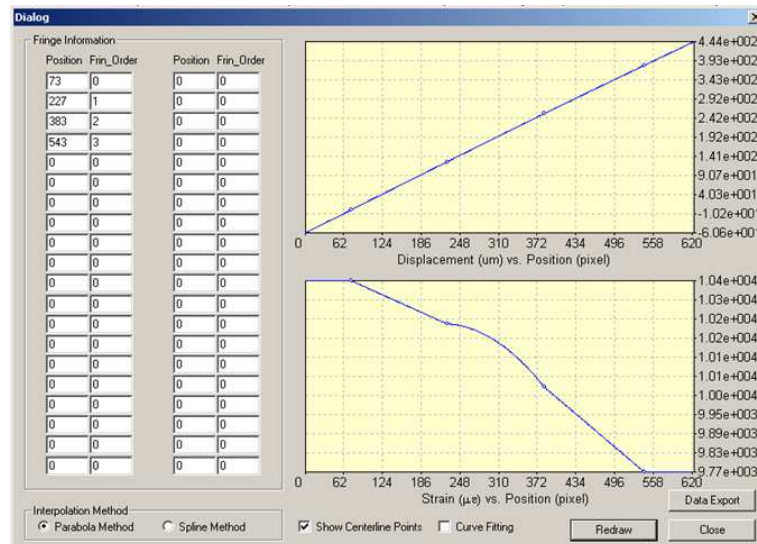


Tabela 3.9 - Resultados dos deslocamentos Δ_x e deformação específica ε para o EV01 com multiplicação de franjas por 2

Cálculo analítico		TMGD (média horizontal em três alturas)		Desvio (%)	
Δ_x (μm)	ε (μ)	Δ_x (μm)	ε (μ)	u_{\max}	ε
513	10258	515	10225	0,39	0,32

Observa-se que neste caso o resultado da medição é o mesmo, mas a sensibilidade acompanha o número de franjas/ μm e dobra também.

3.8.6 – Ensaio EV02 - Aplicação da TMGD (Arranjo 1)

Nos itens anteriores viram-se casos, onde mesmo sem multiplicação aparecem franjas no campo de visão. No presente item a deslocamento máximo total aplicado é de $\Delta x = 0,127$ mm, menor do que o período do retículo e foi aplicado na imagem IMG 140, com comprimento na direção x de 84,007 mm. Neste caso, as franjas só vão aparecer depois da rotina DFM.

A deformação aplicada:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_x}{\ell_0} = \frac{0,127}{(84,007)} = 1511,780\mu$$

O espaço entre franjas:

$$\delta = \frac{1511,780 + 1}{1511,780} = 168,260 > 84,007 \text{ mm}$$

Geração da imagem deformada $I_{0scaled}$

A imagem I_0 será deformada utilizando-se do comando TJ *scale*, aplicados a I_0 , e conforme cálculos anteriores:

$$\text{Fator de escala} = \frac{\Delta_x + \ell_0}{\ell_0} = \frac{0,127 + 84,007}{84,007} = 1.001$$

Digitando-se este número no comando *TJ scale* obtêm-se a imagem $I_{0scaled}$.

3.8.6.1 – Aplicação do Método DFM para Multiplicação de Franjas do Ensaio EV02 por Quatro

No *software image J*, obtêm-se de I_0 imagens deslocadas de $1/4 g$, $1/2 g$ e $3/4 g$, onde $g = 15,781$ pixels, mostradas na Figura 3.36.

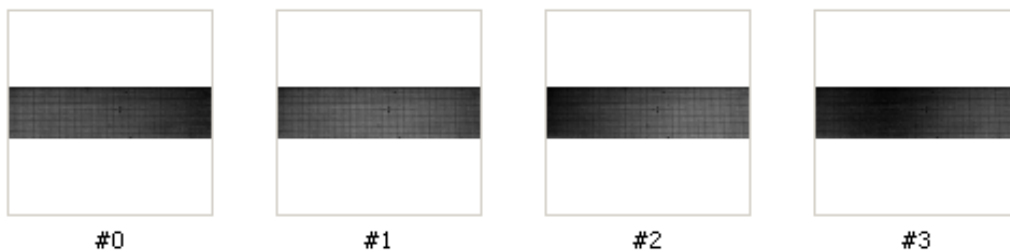


Figura 3.36 - Interferogramas de fase deslocada.

Estas imagens são adicionadas uma a uma com $I_{0scaled}$ e são obtidos os interferogramas #0, #1, #2 e #3.

O programa *MAS* possui uma rotina específica para multiplicação de franjas pelo método **ODFM** (agora **DFM**), para entrada de dados com 4 interferogramas.

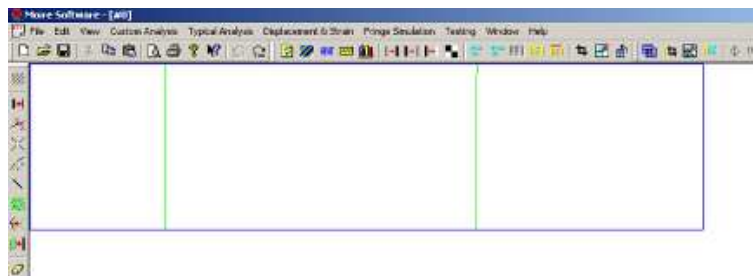


Figura 3.37 - Franjas refinadas após a rotina DFM obtidas no software MAS partir de #0, #1, #2 e #3.

3.8.6.1.1 – Resultados da Multiplicação das Franjas do Ensaio EV02 por Quatro

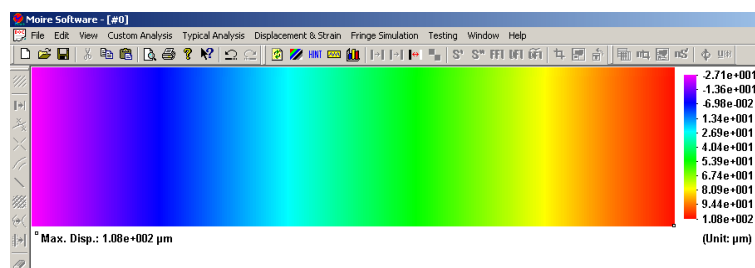


Figura3.38-Deslocamentos em x.

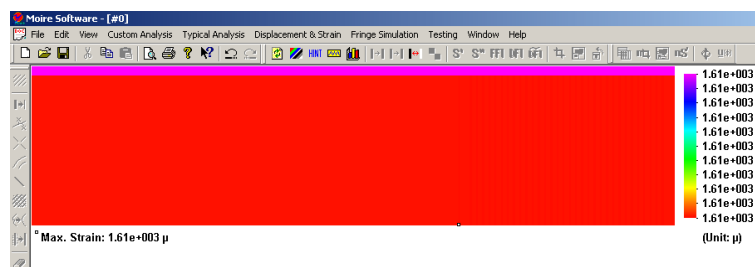


Figura 3.39 - Deformação em x.

Tabela 3.10 - Resultados dos deslocamentos Δ_x e deformação específica ε para o EV02 com multiplicação de franjas por 4.

Cálculo analítico		TMGD (média em três alturas)		Desvio (%)	
Δ_x (μm)	ε (μ)	Δ_x (μm)	ε (μ)	u_{\max}	ε
127	1511,78	135	1610	6.29	6,50

3.8.7 – Ensaio EV03 - Aplicação da TMGD (Arranjo 2)

A Img 150 foi obtida do corpo-de-prova real, com gravação do retículo em máscara fotográfica em cor azul, e iluminação circular. Ver Figuras 3.25 e 3.41.

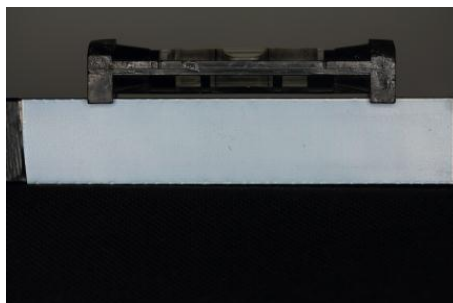


Figura 3.40 – Img 150 do EV03

Seguindo procedimentos análogos aos dos ensaios EV01 e EV02, foi aplicado na imagem um deslocamento $\Delta_x = 319 \mu\text{m}$, correspondendo a uma deformação de $\varepsilon = 6569 \mu$.

3.8.7.1 – Aplicação do Método DFM para Multiplicação de Franjas do Ensaio EV03 por Quatro

Com procedimentos análogos aos itens anteriores foi obtido o interferograma de multiplicação das franjas obtidas no ensaio EV03 por quatro, mostrada na Figura 3.41.

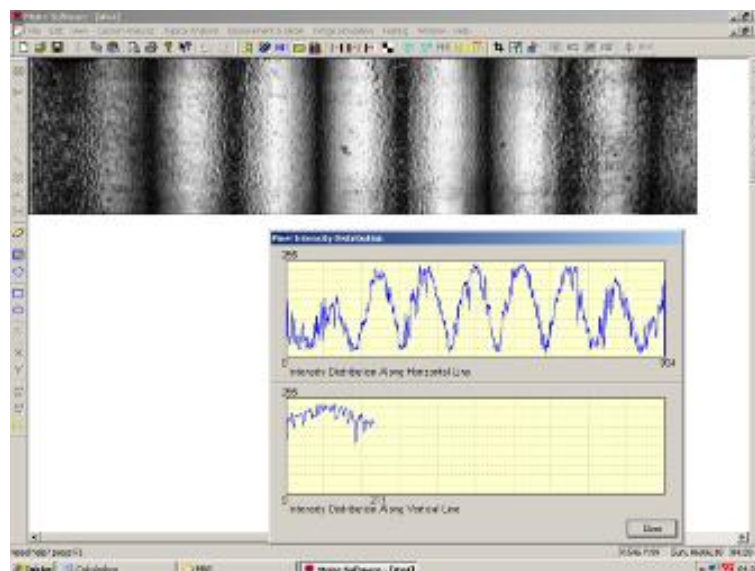


Figura 3.41 - Interferograma obtido pela aplicação do DFM no *software IMAGE J* visto no MAS.

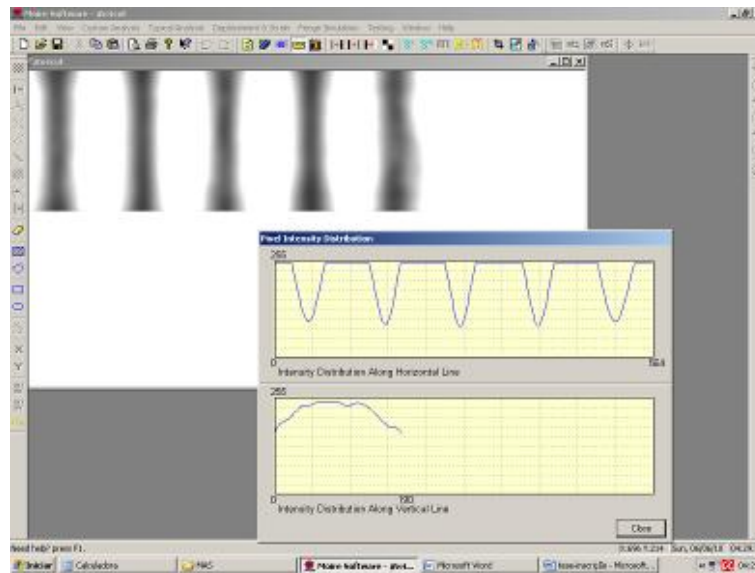


Figura 3.42 - Interferograma da Figura 3.41 após filtros e corte de zonas de ruídos no programa MAS.

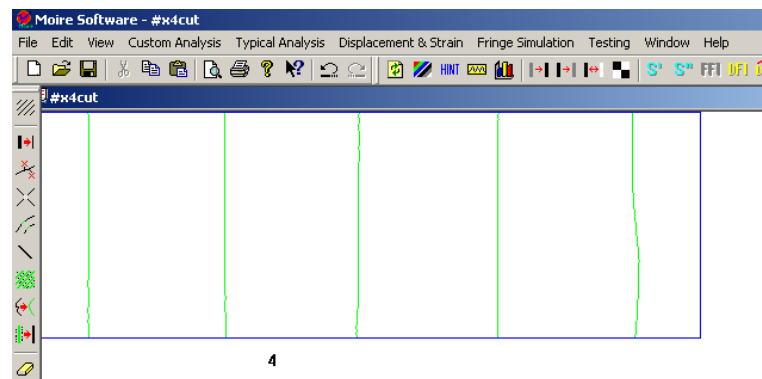


Figura 3.43 - Franjas refinadas.

The screenshot shows the Moire Software control parameters dialog box. It contains three sections: 'Interpolation/Unwrapping' with radio buttons for '1-D Parabola' (selected), '1-D Spline', and 'N/A'; 'Parameter' with radio buttons for 'Ref. Grating's Frequency (M): 189 lines/mm' and 'Equation: U = 63.5 (um) x N' (selected); and 'Image Scale' with input fields for 'Pixels on Specimen: 564 (number)' and 'The Real Length: 48.61767 (mm)'. The dialog box has 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Figura 3.44 - Parâmetros de controle.

3.8.7.1.1 – Resultados da Multiplicação das Franjas do Ensaio EV03 por Quatro

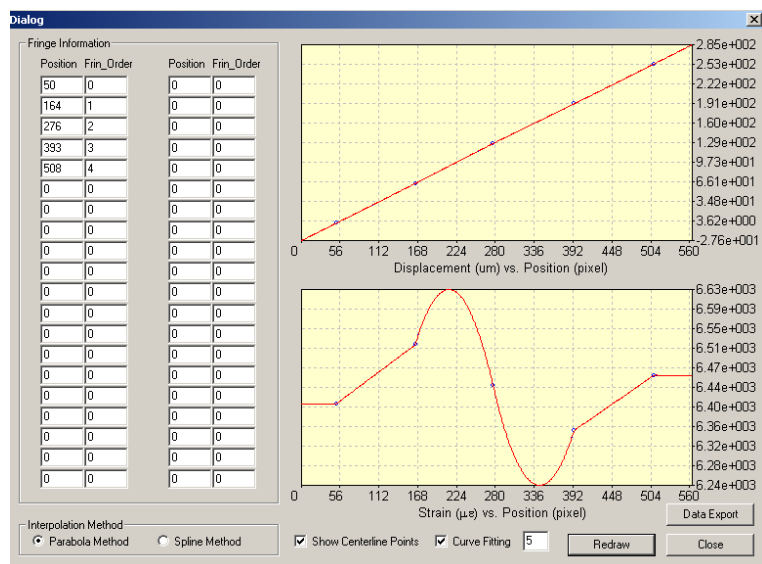


Figura 3.45 - Resultados ao longo de uma linha horizontal da região central.

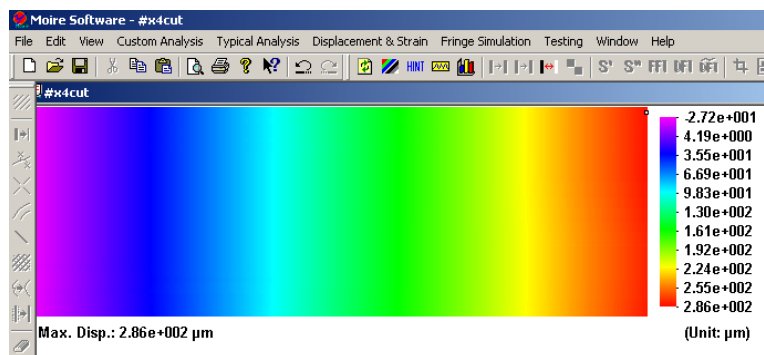


Figura 3.46 - Resultados dos deslocamentos em x.

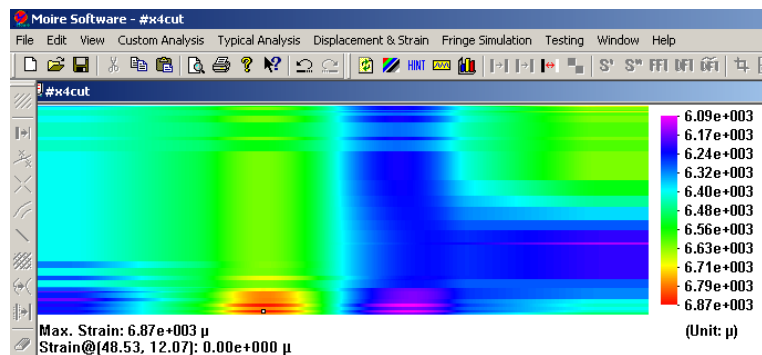


Figura 3.47 - Resultados da deformação em x.

Tabela 3.11 - Resultados dos deslocamentos Δ_x e deformação específica ε para o EV03 com multiplicação de franjas por 4

Cálculo analítico		TMGD (linha média horizontal)		Desvio (%)	
Δ_x (μm)	ε (μ)	Δ_x (μm)	ε (μ)	u_{\max}	ε
319	6569	313	6435	1.88	2,0

3.8.8 - Ensaio EV04 - Aplicação e Resultados da TMGD e da rotina MULTIFRAN para multiplicação de Franjas por 2, 4, 8, 16 e 32 (Arranjo 2)

Nesta aplicação da TMGD, foi utilizada a Img 155 do corpo-de-prova da Figura 3.40.

A imagem Img 155 foi deformada de forma a gerar 2 franjase posteriormente, foi aplicado o método DFM com a rotina MULTIFRAN para multiplicação com $\beta = 2, 4, 8, 16$ e 32. O resultado está mostrado na Figura 3.48.

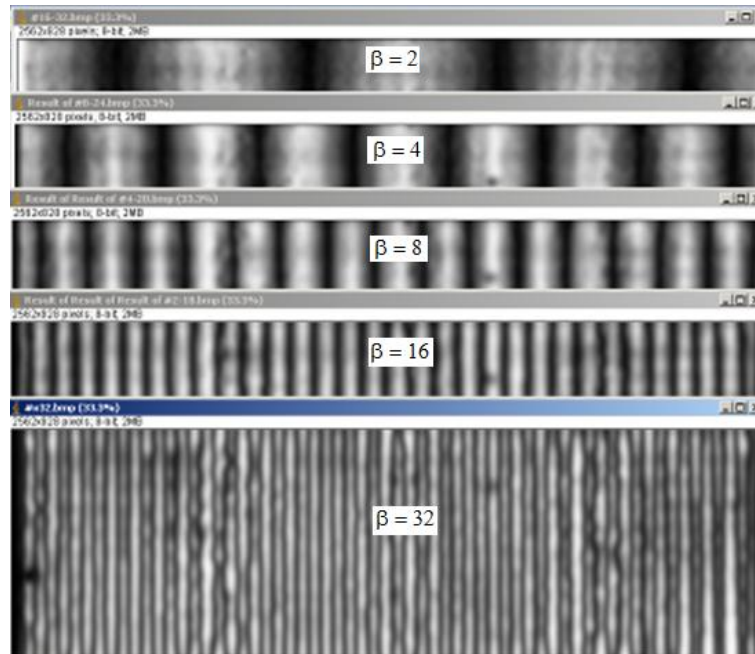


Figura 3.48 -EV04 multiplicação de franjas por 2, 4, 8, 16 e 32 vezes pela rotina MULTIFRAN.

3.9 - Ensaios Experimentais Completos

Foram feitos inicialmente dezenas de ensaios parciais de gravação e aplicação de retículos em modelos, em diversos locais.

Depois de vencidos os primeiros obstáculos de ordem teórico-experimental, foram providenciados o equipamento computacional e câmera. Uma vez de posse de aparatos experimental, computacional e fotográfico, os ensaios completos foram feitos nas instituições indicadas nas legendas das Figuras 3.49 a 3.52. Estes ensaios serviram como base para o aperfeiçoamento contínuo dos procedimentos experimentais e computacionais adotados.

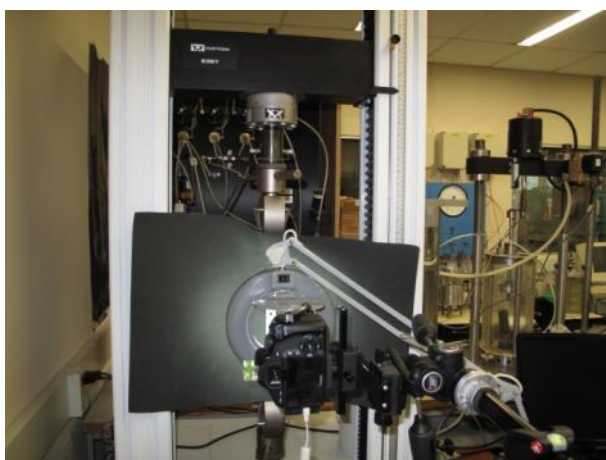


Figura 3.49 – Ensaios de tração direta do CP03, no LMS - Laboratório de Mecânica dos Solos – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

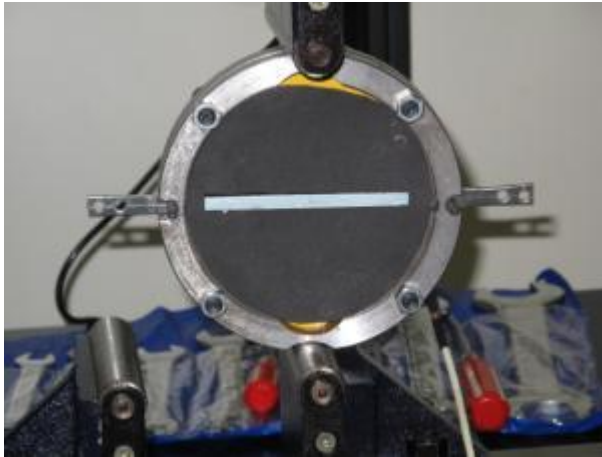


Figura 3.50 – Ensaios de tração direta do CP02, no LACAM-Laboratório de Caracterização de Materiais. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo.

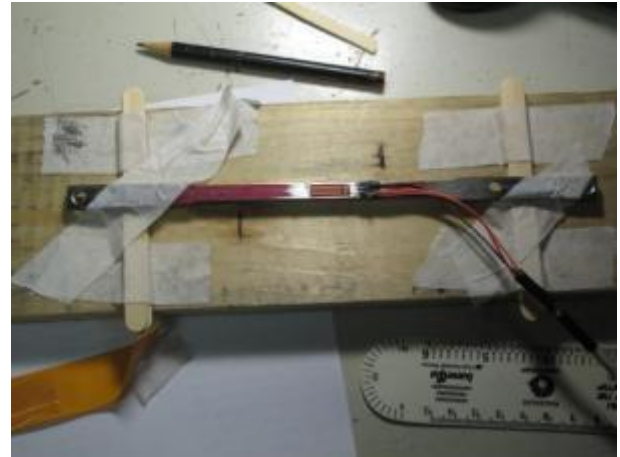


Figura 3.51 – Ensaios de flexão do CP05, no LAMEB Laboratório de Propriedades Mecânicas dos Materiais Biológicos. Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP.

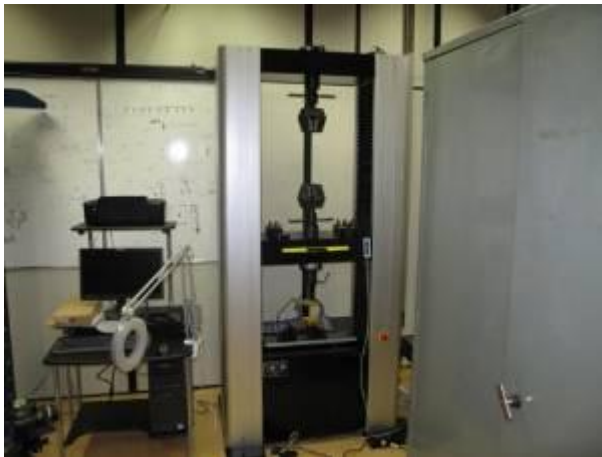




(a) Modelo, posicionado em anel de aço (confeccionado na oficina mecânica da FEAGRI) para ensaio de tração indireta.



(b) Colagem do *strain-gage* no verso do modelo de aço doce.

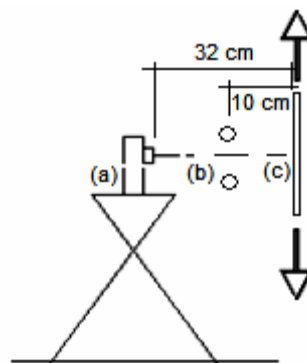


(c) Máquina universal de ensaios.



(d) Ensaio de tração direta em modelo de aço doce.

Figura 3.52– Ensaio experimental de tração do CP04, no Laboratório de Mecânica Estrutural e Monitorização - LABMEM-FEC-UNICAMP.



(a) câmera Rebel T2i; (b) fonte de luz circular vazada; (c) modelo.

Figura 3.53 - Arranjo experimental óptico dos ensaios à tração direta uniaxial, no LMS / EPUSP, LACAM / CTMSP, no LABMEM / FEC – UNICAMP, e flexão LAMEB / FEAGRI – UNICAMP.

Os retículos foram fotolitografados sobre os modelos de barras prismáticas em aço doce. Alguns motivos deste material ser escolhido são as suas propriedades de isotropia e módulo de elasticidade relativamente alto, em comparação com os demais materiais de construção civil.

Salvo exceções, as cargas foram correspondentes a 100%, 75%, 50% e 25% da tensão limite de proporcionalidade do aço, mas a leitura sempre foi feita com a carga estática.

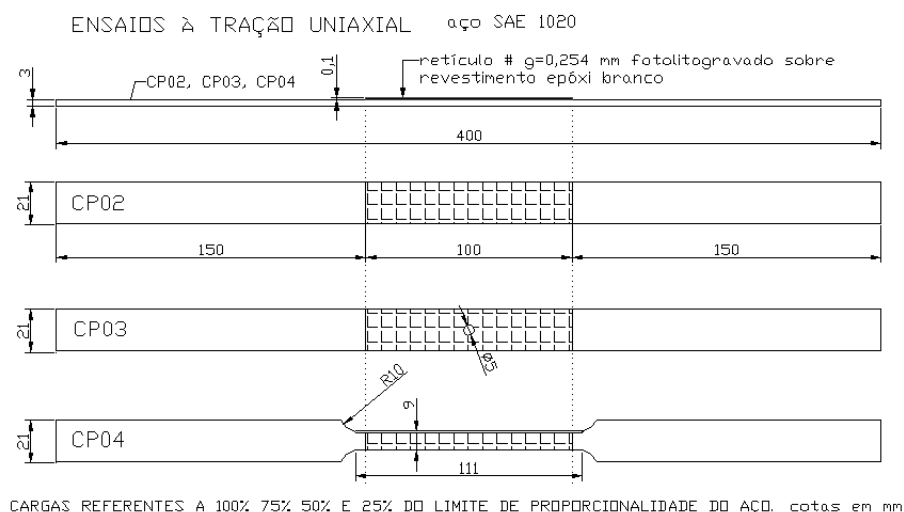


Figura 3.54 – Detalhes dos modelos de aço doce ensaiados à tração.

O aço SAE1020 - 0,2% de carbono foi utilizado nos ensaios, e as suas propriedades mecânicas são:

- Módulo de elasticidade do aço = 2028000 daN/cm² (obtido por ensaios);
- limite de resistência = 4400 daN/cm² (tabelados);
- limite de escoamento = 2750 daN/cm² (tabelados);
- limite de proporcionalidade = 2100 daN/cm² (tabelados).

As frequências dos retículos gravados foi $f = 3,94$ linhas/mm ($g = 0,254$ mm) na empresa Multi - circuitos Tecnologia (S.P.).

O único modelo que se conseguiu gravar com retículo de 7,87 linhas/mm, apesar de diversas tentativas em várias empresas, por vários processos, foi ensaiado no Laboratório de Estruturas e Materiais – LEMC – FEC - Unicamp.

3.9.1 - Ensaios no Laboratório LEMC FEC - UNICAMP

Antes do ensaio no LEMC, os modelos foram levados para a empresa LMC para proceder à gravação de retículos, conforme item 3.2.2.3.3.

Os retículos foram gravados sobre o revestimento de epóxi branco de 1 mm de espessura, previamente preparado pelo autor, para servir de fundo reflexivo. Após a revelação, formou-se a imagem do retículo no corpo-de-prova.

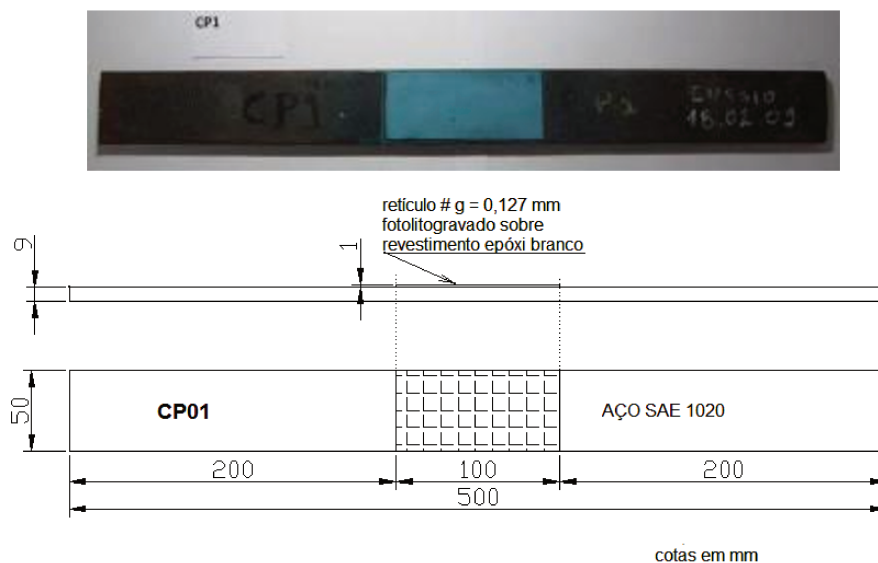


Figura 3.55 – CP01 – LEMC - Corpo-de-prova em aço doce; dimensões 9 x 50 x 500mm; comprimento base de medição = 100mm, revestido com película plana de epóxi branco semi-flexível de 1 mm.

Dados do ensaio:

Retículo de amplitude (*laser* He-Ar), com linhas em cruz, com passo $g = 0,127$ mm;

$f = 7,87$ linhas/mm;

Fator de escala da foto 6: 50 mm = 2928pixels \rightarrow 585,6 pixels/cm;

Material: aço doce SAE 1020;

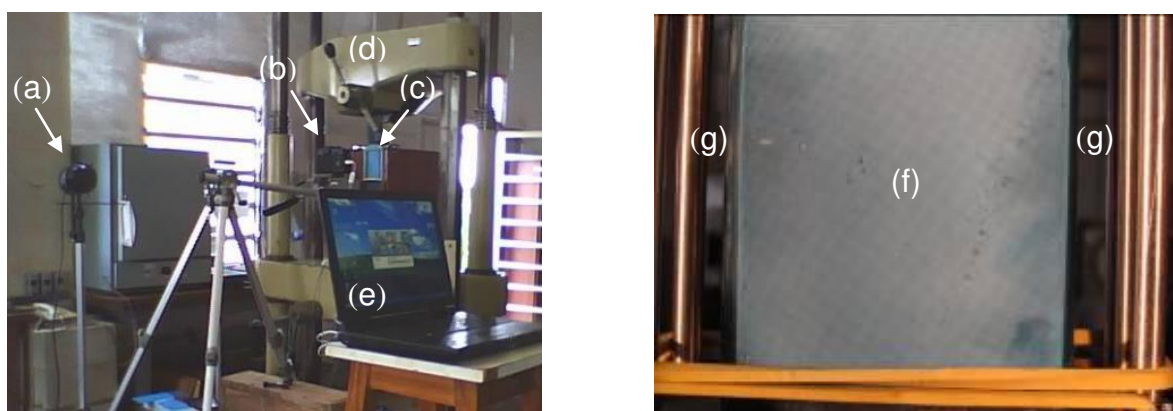
Dimensões do modelo = 9x50x500 mm;

Dimensões do revestimento epóxico branco = 1x45x105mm;

Calibração: dois extensômetros elétricos tipo clip-gage com base 100 mm fixos nas laterais do modelo.

Desvios medidos após os ensaios: ângulo *grid* com a vertical = 1,32 graus H, ângulo eixo da barra com a vertical = 1,13graus H;

A Figura 3.56 mostra o arranjo geral do ensaio e detalhes do CP01.



(a)-Fonte de luz; (b) câmera; (c) modelo; (d) máquina de ensaios à tração; (e) disparo remoto por notebook.

(f) Retículo do modelo; (g) Hastes de fixação dos extensômetros elétricos, controlados por um microcomputador que não aparece na foto.

Figura 3.56 - Arranjo geral do ensaio a tração à esquerda, e detalhes do modelo CP01 à direita. Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMC) da FEC-UNICAMP.

Tabela 3.12 - Dados das fotos do ensaio

ITEM	ARRANJO	ITEM	ARRANJO
File Name	Capture_00002.JPG	Lens	6.1 - 30.5 mm
Camera Model Name	Canon PowerShot G10	Focal Length	10.8 mm
Shooting Date/Time	18/2/2009 13:35	Digital Zoom	None
Shooting Mode	Manual	IS Mode	On
My Colors Mode	Off	Image Size	4416x3312
Tv (Shutter Speed)	jan/13	Image Quality	Superfine
Av (Aperture Value)	6.3	Flash	Off
Light Metering	Spot	White Balance	Auto
ISO Speed	80	AF Mode	Single AF
AF Range Mode	Macro	Sharpness	Normal
Parameters		Saturation	Normal
Contrast	Normal	Color Space	sRGB
Fotos com modelo parado; distância lente-objeto = 8 cm			

Tabela 3.13 - Quadro de cargas e resposta do corpo-de-prova

Imagem n°	Força Normal (daN)	Tensão (daN/cm ²)	Deformação calculada (μ)	Deformação média (extensômetro clip-gage) (μ)	Modulo elástico (daN/cm ²)	Deformação média por <i>moiré</i> (μ) sem multiplicação de franjas (μ)	
						<i>software</i>	manual=g/δ
2	200	40	*****	10	2028000	*****	*****
3	3125	625	308	351	2028000	*****	*****
4	6250	1250	616	789	2028000	*****	*****
5	9375	1875	925	1210	2028000	*****	*****
6	12500	2500	1232	1521	2028000	3615	3971

Observar que as franjas geradas a partir da foto 6, sem multiplicação, não eram previstas, e mostram uma deformação maior do que a que foi medida pelos extensômetros. Uma possibilidade de justificativa para este fato é o aumento de resolução pela lente da câmera, comentado no item 2.4.8.1.2. As Figuras 3.55 e 3.56 mostram os resultados das franjas para os quatro estágios de carga com multiplicação, pela rotina MULTIFRAN, para $\beta = 8, 16$ e 32 .

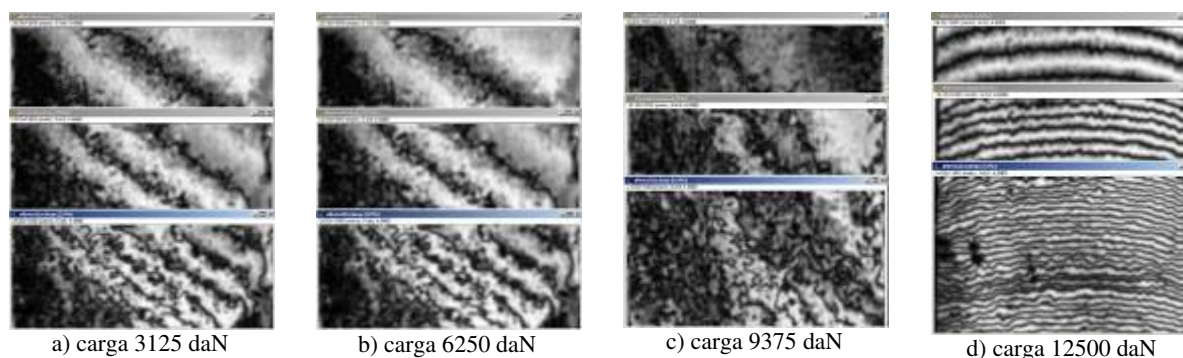


Figura 3.57 - Franjas de deslocamento do campo u (x)-multiplicadas por 8, 16 e 32 vezes (de cima para baixo).

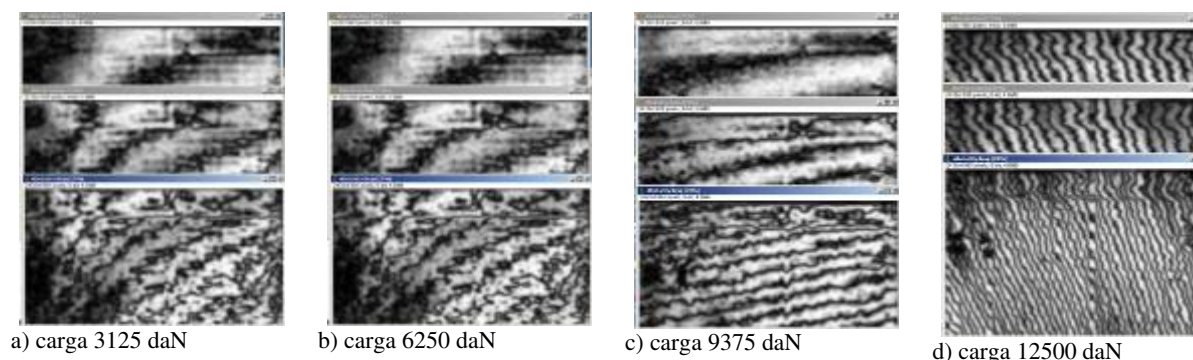


Figura 3.58 - Franjas de deslocamento do campo v (y)-multiplicadas por 8, 16 e 32 (de cima para baixo).

Inicialmente, não foi possível fazer multiplicações acima de $\beta=32$ porque, para cargas de 12500 daN, a proximidade excessiva das linhas de franjas não é suportada pela resolução de tela do programa MAS. Porém, após o processamento com filtros avançados *self adaptative filter* e o *Phase-shift Filtering* no programa MAS, houve uma significativa eliminação de ruídos, que aumentou a resolução das linhas de franja, e possibilitou a multiplicação por $\beta=64$, o que equivale à sensibilidade de um retículo teórico de 503,9 linhas/mm, cujo resultado para a carga de 12500 daN está mostrado na Figura 3.59.

O filtro avançado era a peça que faltava para alcançar os requisitos de resolução para medição em materiais com um módulo de elasticidade maior e com valores de deformações mais baixos.

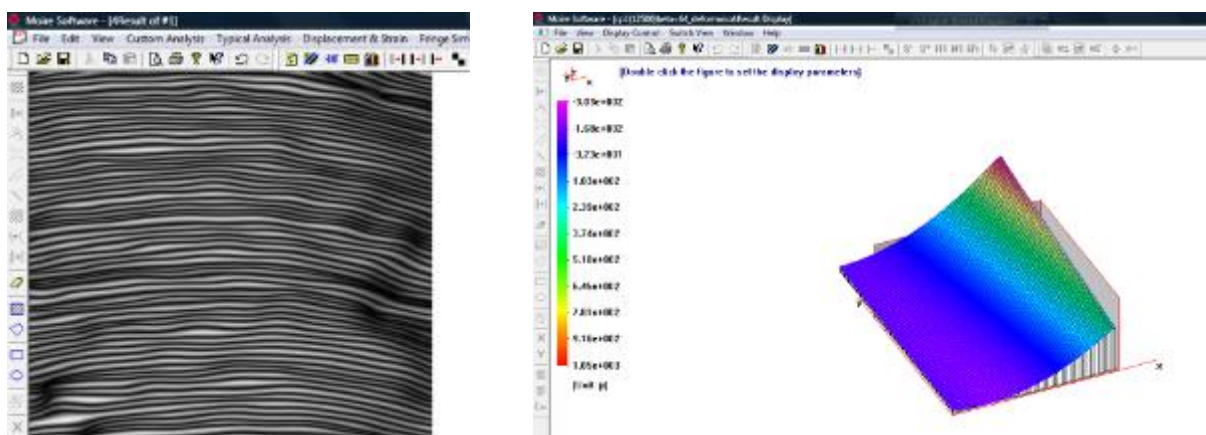


Figura 3.59 - Alta densidade de franjas e distribuição em campo inteiro de deformações obtidas por interpolação b-direcional e filtragem avançada, para o campo u , com fator de multiplicação $\beta=64$ e carga 12500 daN.

O método ultrapassou o objetivo inicial, que era fazer medições em madeira, e estendeu a sua aplicação para praticamente todos os materiais de construção.

3.9.2 - Ensaio no Laboratório LMS Laboratório de Mecânica de Solos da EPUSP

No laboratório LMS da EPUSP não foi possível ter assessoria de extensômetros, e por isto foram feitos ensaios a tração no CP03, sujeito à concentração de tensões devido à existência de um furo central, conforme mostra a Figura 3.54. Os carregamentos foram feitos para 527 daN e 954 daN. O resultado obtido não correspondia a conformação de franjas da bibliografia consultada.

3.9.3 - Ensaios no LACAM –Laboratório de Caracterização de Materiais do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo CTMSP

No CTMSP o objetivo inicial era fazer uma comparação pontual com o vídeo extensômetro acoplado à máquina de ensaios. O *layout* do espaço físico, infelizmente, não permitiu que os dois sistemas fossem utilizados simultaneamente. Restou a opção de utilizar o extensômetro tipo *clip-gage*. Foram ensaiados 6 exemplares do corpo-de-prova CP02 para as cargas de 70, 150, 600 e 1000 daN. Os resultados não convergiram.

3.9.1 - Ensaios no Laboratório LABMEB FEAGRI – UNICAMP

O CP05 mostrado na Figura 3.51, com o arranjo óptico da Figura 3.53, e detalhado na Figura 3.60, foi ensaiado a flexão com cargas de 50, 79, 102, 126, 150 e 280 daN aplicadas nos dois roletes.

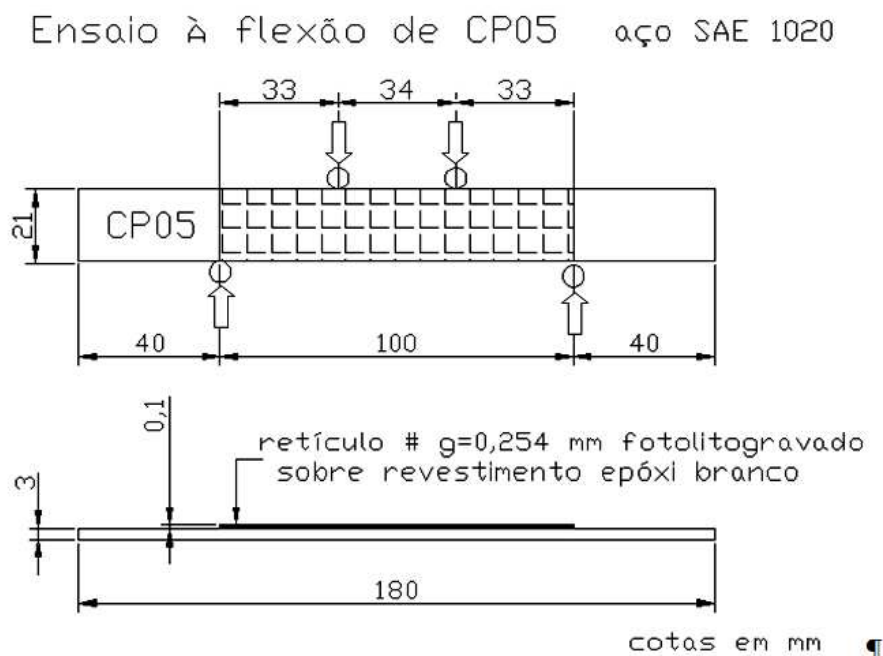


Figura 3.60 – Detalhes do CPO5 para ensaio de flexão.

O resultado, qualitativamente, mantém semelhança, mas não conferiu com o resultado esperado, conforme pode ser visto na Figura 3.61.

Apesar do ensaio de compressão ter muito menos problemas de movimento de corpo rígido do que o ensaio a tração, o aparato utilizado no laboratório não possuía a exatidão micrométrica requerida na aplicação e posicionamento da carga.

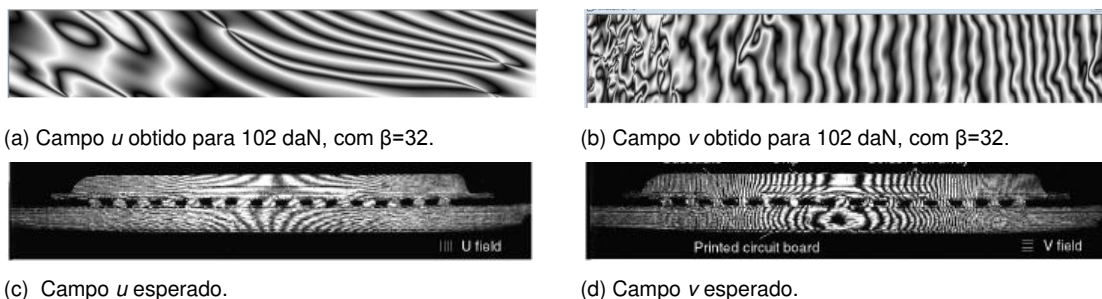


Figura 3.61 – Comparação entre os padrões dos resultados obtidos do ensaio com o CP05 (a) e (b) com o obtido por TMI em interferômetro de 1200 linhas/mm para flexão de placa de circuitos impressos em 4 pontos, (c) e (d), por PHILLIPS (2001).

3.9.2 - Ensaios no Laboratório LABMEM FEC – UNICAMP

3.9.2.1 - Ensaios com os modelos de aço doce CP04

Foram ensaiados à tração direta e indireta modelos de aço doce CP04, mostrados na Figura 3.54, com retículo fotolitografado em pontos quadrados, com frequência de 3,94 linhas/mm.

Esta frequência periódica produziu baixa densidade de franja para os valores de deformação mais baixos, e o resultado numérico coincidiu com os dos *strain-gages* em alguns pontos, mas sem acompanhar a variação de carga nos demais pontos.

3.9.2.2 - Ensaios com o modelo de madeira CPM

O ensaio seguinte foi feito à tração com um modelo de madeira ipê CP05, mostrado na Figura 3.62. Os carregamentos estáticos foram aplicados dentro do limite de proporcionalidade tabelado para o material.

Este modelo foi revestido com epóxi branco plano de aproximadamente 0,1 mm de espessura. Foram desenhados sobre o epóxi branco dois eixos ortogonais, em cruz, passando pelo centro do

modelo. O plástico *mylar* contendo o retículo, com frequência de 7,87 linhas/mm, foi colado sobre o revestimento epóxi com araldite transparente, tomando os eixos já desenhados como referência.

Esta última técnica apresentou uma formação de franjas regular, que possibilitou a extração de resultados numéricos.

As marcas no centro do modelo e os eixos cruzados, desenhadas anteriormente, foram utilizados para impor a coincidência das duas imagens desta maneira, eliminar/minimizar os deslocamentos e as rotações de corpo rígido no plano do modelo.

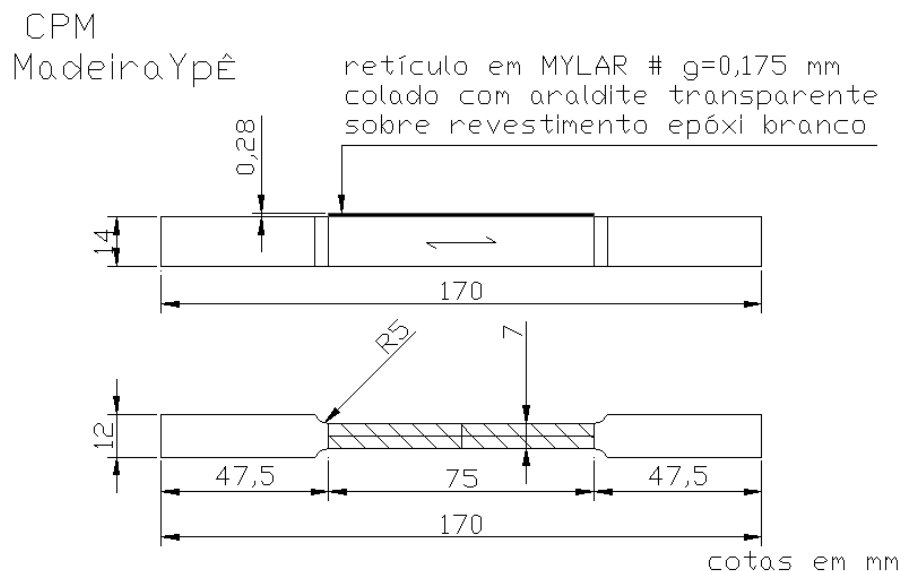


Figura 3.62 – Detalhes do CPM para ensaio de tração.

Ficou finalmente resolvido o problema de rotações e deslocamento de corpo rígido no plano do modelo, que vinha atrapalhando a interpretação da formação das franjas.

Como neste experimento não foram colados *strain-gages*, os resultados da TMGD foram comparados com valores teóricos calculados para o módulo de elasticidade do ipê extraídos de tabelas.

Os resultados numéricos também coincidiram pontualmente, mas não acompanharam a evolução do carregamento.

4 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

As primeiras simulações feitas para deformações da ordem de 10000 μ , com arquivos de imagem JPEG e câmeras de 6.0 megapixels produziram desvios da ordem de 7%. Quando os arquivos de imagem RAW e a câmera de 18 megapixels foram introduzidos nas simulações computacionais os desvios caíram para menos de 1%.

Tabela 3.7 - Resumo dos resultados dos deslocamentos Δ_x (μm) e deformação específica ε (μ)

Ordem	Ensaio	Imagem	Arranjo	Superfície	Fator de multiplicação (β)	Cálculo analítico		TMGD		Desvio (%)	
						Δ_x	ε	Δ_x	ε	u_{\max}	ε
#1	EV01	128	1	especular	1	513	10258	511	10200	0,39	0,60
#2	EV01	128	1	especular	2	513	10258	515	10225	0,39	0,32
#3	EV02	140	1	difusa	4	127	1511,78	135	1610	6,29	6,50
#4	Ev03	150	2	difusa	4	319	6569	313	6435	1.88	2,0

Observar que o Arranjo 1 foi feito com iluminação não circular .

Pode-se notar, observando a tabela acima, que as imagens difusas dos retículos gravadas no modelo produzem um maior índice de ruídos do que as imagens especulares dos retículos sobre o plástico *mylar*, e que a ortogonalidade de luminosidade proporcionada pelo uso da iluminação circular do Arranjo 2 também reduz os ruídos.

Observar que a Figura 3.41 mostra o aspecto da onda de intensidades com ruídos devido à reflexão da luz pela superfície difusa do modelo.

Levando-se em consideração que o resultado #3 pode ser melhorado com a utilização da iluminação circular, consideram-se estes resultados satisfatórios por estarem todos com desvio

abaixo de 5%. Além do mais, se for aplicada a filtragem avançada, estes valores tenderão a cair mais ainda.

Esta parte da pesquisa comprova, portanto, que os métodos e a câmera utilizada são adequados para este tipo de medição.

Porém, os resultados experimentais em laboratório não acompanharam os resultados virtuais, e os motivos para isto estão descritos a seguir.

Os ensaios experimentais nos laboratórios LEMC (FEC-UNICAMP); LMS (EPUSP); LAMEB (FEAGRI) e LACAM (CTMSP) forneceram resultados de caráter qualitativo.

Já os ensaios executados no laboratório LABMEM (FEC - UNICAMP) forneceram resultados quantitativos de deformações, e o módulo de elasticidade real do aço doce utilizado nos ensaios.

Os ensaios feitos nos laboratórios LMS (EPUSP) e LAMEB (FEAGRI), não tiveram assessoria de nenhum tipo de extensômetro. Os ensaios feitos no LEMC (FEC - UNICAMP) e LACAM (CTMSP) tiveram assessoria de extensômetros tipo *clip-gage*.

O laboratório LABMEM (FEC – UNICAMP) possui instrumentação adequada para a utilização de *strain-gages* elétricos. Neste laboratório foram feitos ensaios de tração uniaxiais diretos e indiretos em modelos de aço doce.

Os ensaios de tração indiretos foram feitos por compressão de um anel de aço, construído na oficina mecânica da FEAGRI, para minimizar os efeitos de movimento de corpo rígido na direção do esforço introduzido pela prensa (ver Figura 3.52 a). Este ensaio possibilitou uma análise mais crítica dos fenômenos envolvidos, pela eliminação das franjas de movimento; porém, os resultados numéricos corretos foram alcançados apenas em alguns pontos e nos demais eles não acompanharam sequer as tendências esperadas, produzidas pelas variações dos carregamentos aplicados.

O ensaio com o modelo de madeira, também produziu resultados corretos somente pontuais.

A explicação para este fato é obtida na descrição do método da dupla exposição com dois negativos fornecidos pela bibliografia, e descrito no item 2.4.8.1.2.1. Esta descrição baseou-se em câmeras fotográficas analógicas, mas tem problemas fisicamente semelhantes aos das câmeras digitais utilizadas na TMGD.

Apesar dos detalhes experimentais serem muitos, aqui são destacados três quesitos principais:

1. A câmera e o modelo necessitam de providências para uma estabilização eficaz, tais como os mostrados na Figura 2.42 (b).
2. Devido ao referencial da TMGD ser o piso do laboratório e não a superfície do modelo, como no caso dos *strain-gages*, o posicionamento espacial do modelo e da câmera tem que ter exatidão micrométrica, para controlar movimentos de corpo rígido.
3. São necessários instrumentos adicionais para assessorar os experimentos tais como fotômetros para controlar a iluminação, LVDTs acoplados ao modelo para monitorar movimentos acidentais de corpo rígido, e sistemas *lasers* para monitorar o posicionamento espacial do arranjo do ensaio, semelhantes ao mostrado na Figura 2.42 (a).

Para satisfazer a estes três quesitos principais teriam sido necessários investimentos no re-equipamento dos laboratórios de estruturas, que fugia ao escopo desta tese.

Os dados obtidos nos ensaios feitos no LEMC tratados com filtragem avançada forneceram:

- Alta sensibilidade de medição de deslocamentos ($1,984 \mu\text{m/N}$), devido à densidade elevada de linhas de franjas mostrados na Figura 3.59;
- Capacidade de medir deformações pequenas, 20μ ou menos, em base de 100 mm;
- Possibilidade de medir as deformações em campo inteiro, com uma distribuição densa e homogênea de pontos;
- Estes resultados densos apresentam compatibilidade com as hipóteses assumidas para cálculo linear através equações 2.25 do item 2.4.6.2.

Em outro processamento da imagem 3 da Tabela 3.13, o resultado medido da TMGD para multiplicação com fator $\beta = 128$ atingiu uma alta densidade de franjas.

O retículo com densidade de 7,87 linhas/mm mostrou-se mais adequado para trabalhar com a base de deformação de 10 cm, porque consegue densidade adequada de franjas, mesmo para baixas deformações, e sem excesso de ruídos.

Retículos com densidades de 3,94 linhas/mm podem ser adequados para medições em modelos maiores, pois no caso de comprimento de base maior é possível obter-se um maior número

relativo de franjas. Para isto, a lente objetiva da câmera terá que ser substituída por uma de campo mais largo, do tipo tele, para adquirir as imagens a partir de uma distância maior.

Medições de maior sensibilidade poderão ser feitas com retículos mestres, adquiridos em empresas de óptica científica, manufaturados em cromo aplicado sobre vidro transparente, com exatidão de $0,2\ \mu$ por polegada (127000 dpi). Estes retículos serão gravados por exposição à luz UV em filme seco de espessura igual ou inferior a $15\ \mu\text{m}$, aplicado sobre placas de vidro. A seguir, o retículo será transferido para a superfície do epóxi ainda fresco para aderir ao modelo (ver Figura 3.14).

A utilização destes retículos de alta resolução permite uma grande eliminação de ruídos.

Como a câmera é capaz de adquirir imagens de retículos com frequência de até 20 linhas por mm, a multiplicação, por exemplo, com fator $\beta = 128$ produzirá uma medição com sensibilidade de $0,1\ \mu\text{m}/\text{N}$, equivalente a um retículo de 2560 linhas.

Como já foi descrito na revisão bibliográfica (2.4.8.1.2), esta resolução poderá ser aumentada, ainda mais, pela lente da câmera.

5 - CONCLUSÕES

A proposta inicial desta tese foi utilizar a técnica de *moiré* geométrico (TMG) com sensibilidade melhorada para medições em madeira. A revisão bibliográfica inicial apontava na direção de que as medições com madeira seriam mais adequadas devido às limitações da TMG.

As Figuras 3.32 e 2.33 mostram a multiplicação de franjas por O/DFM com o fator $\beta = 10$ que foi o ponto de partida da pesquisa

Este trabalho produziu, de maneira inovadora, a técnica de *moiré* geométrico digital (TMGD), que permitiu o aumento do fator β de 10 para 128, para o sistema de 8 bits, fazendo uso da versão digital de multiplicação de franjas DFM.

A aplicação da TMGD, com a multiplicação de franjas por DFM, e a técnica aqui desenvolvida para aplicar os retículos no modelo, estendeu a proposta inicial, feita só para a madeira, para praticamente todos os materiais estruturais de construção civil.

A TMGD híbrida, calibrada com *strain-gages*, é uma proposição bastante confiável, pois permite ajustar parâmetros ópticos e físicos e aliar a confiabilidade dos *strain-gages* à medição em campo inteiro pela TMGD.

Esta pesquisa sobreviveu à carência de recursos tecnológicos dos laboratórios de engenharia civil para experimentos com óptica, mas, apesar disto, ela foi capaz de identificar problemas para direcionar o re-equipamento dos laboratórios para a utilização de extensometria óptica por TMGD.

Abaixo foi reproduzida uma declaração que expressava o pensamento da comunidade científica na época de sua publicação:

“Não parece haver nenhuma possibilidade, com a tecnologia atual ou em futuro próximo, da utilização de sistemas baseados em vídeo para captura direta de imagens das linhas dos

retículos, *que devem ser finas o suficiente para servir para a maioria dos casos de análises de deformação*”(CLOUD, 1998, p.162).

O desenvolvimento deste trabalho mostrou que os avanços na área de fotônica e computação superaram as expectativas de 1998.

6 - NOVOS RUMOS PARA A PESQUISA

Existe uma grande lacuna em aberto para a continuidade da pesquisa em curto prazo, e alguns itens estão relacionados abaixo:

- 1) Aperfeiçoamento dos resultados quantitativos pela inclusão de instrumentos para medição de luminosidade e aparatos de laboratório para controle de estabilidade do modelo e da câmera.
- 2) Aperfeiçoamento das técnicas de filtragem e rotinas computacionais associadas existentes.
- 3) Exploração da técnica de replicação de retículos mestres de alta resolução com maior densidade, utilizando microfotolitografia com filme seco de espessura igual ou inferior a 15 μ m.
- 4) Exploração de novos modelos de câmeras e de novos recursos de *software* e *hardware*.
- 5) A aplicação da TMGD para grandes objetos tais como pontes e edifícios.
- 6) A aplicação da TMGD com retículos metálicos em altas temperaturas.
- 7) Desenvolvimento da TMGD em escala nanométrica.
- 8) Aperfeiçoamento de micro-câmeras acopladas ao modelo para monitorização e *scanners* fotogramétricos para a utilização com a TMGD.
- 9) Aplicações mistas da TMGD com outras técnicas de luz branca tais como a fotografia *speckle*, a correlação digital de imagens (DIC) e a técnica do retículo.
- 10) Pesquisas conjuntas de técnicas *estereoscópicas* com a TMGD e técnicas de projeção para medições tridimensionais.
- 11) Pesquisas com a TMGD para medição, prevenção e alerta de iminência de deslizamentos de taludes

Este último item, em especial, poderá trazer grandes benefícios sociais.

7 - REFERÊNCIAS

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto-Procedimento**. [S.l.]: [s.n.], 2003.

AFFONSO, E. A.; FABBRO, I. M.; DEMARZO, M. A. **Application of a Moiré Technique in Studying Wooden Structural Connections**. International Congress on Information Technology in Agriculture, Food and Environment- Itafe ' 03. Izmir, Turkey: [s.n.]. 2003. p. 608-611.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A.; PEZZOTA, C.. **Photonita Metrologia Óptica**, out. 2003.

Disponível em:

<<http://www.photonita.com.br/downloads/Artigo%20Metrologia%20e%20Instrumentacao.pdf>>.

Acesso em: 05 fev. 2010.

ALMEIDA, L. C. **Identificação de Parâmetros Estruturais com o Emprego de Análise Inversa**. (Tese de Doutorado) - FEC, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Campinas, p. 184. 2006.

ALMEIDA, L. D. F. **Análise de Tensões e Deformações em um Corpo-de-prova "Compact Tension" Experimentalmente por Extensometria e Teoricamente por MFEL**. (Dissertação de Mestrado) - FEM, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp. Campinas,SP-Brasil, p. 150. 2002.

AMIDROR, I. **The Theory of the Moiré Phenomenon**. Lausanne, Switzerland: Kluwer Academic Publishers, 2000.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. **Extensometria Básica**. notas de aulas-UNESP-Ilha Solteira. [S.l.]. 2004.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 258 p. ISBN 85-86180-07-6.

ASSIS, W. S. **Sistemas Computacionais de Apoio à Monitorização de Estruturas de Engenharia Civil**. (Tese de Doutorado em Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 296. 2007.

ASUNDI, A. K. Computer Aided Moiré Methods. **http://www3.ntu.edu.sg/mae/research/programmes/sensors/sensors/moire/camm.html**, 1998. Acesso em: 01 fev. 2010.

AUSTIN, S.; STONE, F. T. Fabrication of thin periodic structures in photoresist. **Applied Optics**, 15, 4, 1976. 1070-4.

AVRIL, S. et al. Overview of Identification Methods of Mechanical Parameters Based on Full-field Measurements. **Experimental Mechanics**, 48, n.4, 2008. 381-402.

BELL, J. F. **Experimental Solid Mechanics in the Ninetheenth Century"**. Proceedings of Society for Experimental Mechanics Spring Conference. Cambridge: [s.n.]. 28 June 1989. apud REESE, R. T.; WENDELL, A. K. Handbook on Structural Testing. Bethel: Society of Experimental Mechanics, 1993.

BUCKBEE-MEARS. **Buckbee-Mears Corporation**. Disponível em: <<http://www.precisioforming.com/>>. Acesso em: 18 abril 2011.

BURCH, J. M.; FORNO, C. A High Sensitivity Moiré Grid Technique for Studying Deformation in Large Objects. **Optics in Engineering**, 14, 1975. 175-185.

CHEN, T. C. et al. A Novel Two-Dimensional Method to Measure Surface Shrinkage in Cementitious Materials. **Cement and Concrete Research**, 40(5), 2010. 687-698.

CLOUD, G. Slotted Apertures for Multiplying Grating Frequencies and Sharpening Fringe Patterns in Moiré Photography. **Optical Engineering**, 15,6, 1976. 578-582.

CLOUD, G. **Optical Methods of Engineering Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

CLOUD, G. Optical Methods in Experimental Mechanics. **Experimental Techniques**, 30(5), 2006. 19-22.

CLOUD, G.; BAYER, M. Moiré to 1370°C. **Experimental Techniques**, 12,4, 1988. 24-7.

CLOUD, G.; RADKE, R.; PEIFFER, J. Moiré Gratings for High Temperatures and Long Times. **Experimental Mechanics**, 19, 10, 1979. 19N-21N.

CZARNEK, R. Moiré Interferometry. In: REESE, R. T.; KAWAHARA, W. A. **Handbook on Structural Testing**. Bethel,Connecticut: Society for Experimental Mechanics, Inc., 1993.

D'ACQUISITO, L.; LA PICA, A.; SIDDIOLO, A. M. Wooden Surface Investigation: An Optical Approach Based On Shadow Moiré. In: _____ **Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures-Proceedings of 13th International Conference on Experimental Mechanics**. [S.l.]: [s.n.], 2007.

DALLY, J. W.; SHUKLA, A. **Experimental Solid Mechanics**. 4^a. ed. Knoxville: College House Enterprises, LLC, 2010.

DANTU, P. **Recherches Diverses D'Extensometrie et de Determination des Contraintes**. [S.l.]. 1954. apud Cloud, G. Optical Methods in Engineering Analysis,Cambridge, Cambridge University Press 1998.

DIRKX, J. J. J.; DECRAEMER, W. F. Automatic Calibration Method for Phase Shift Shadow Moiré Interferometry. **Applied Optics**, Washington, 29, n.10, abr. 1990. 1474-76.

DIRKX, J. J. J.; DECRAEMER, W. F.; DIELIS, G. Phase Shift Method Based on Object Translation for Full Field Automatic 3-D Surface Reconstruction from Moiré Topograms. **Applied Optics**, Washington, 27, mar. 1988. n.6, p.1164-69.

DOUMALIN, P. **Microextensométrie Locale par Corrélation d'Images Numériques**. (PhD thesis) -Ecole Polytechnique. [S.l.]. 2000. apud (SURREL,2004a).

DURELLI, A. J.; PARKS, V. J. **Moiré Analysis of Strain**. [S.l.]: Prentice Hall, 1970.

EDMUND OPTICS, C.

<http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productid=2343>. Acesso em: 18 abril 2011.

ÉPOTECNY. **Site da Épotecny Co.** Disponível em: <<http://www.epotecny.com>>.

FÉLIX, C. M. S. **Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte.** (Tese de Doutorado) - Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 206. 2004.

FENG, Q. M. Novel Optical Fiber Sensors for Monitoring Bridge Structural Integrity. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highway/NCHRP124_Final_Report.pdf>, mar. 2009. Acesso em: 04 fev. 2010.

FIORAVANTE JUNIOR, N. P. **Caracterização e Otimização dos Processos de Fotolitografia Aplicados na Fabricação de Dispositivos Micrométricos MOS e Microsistemas.** (Dissertação de Mestrado) - FEEC, Uiversidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas, SP, Brasil, p. 150. 2004.

FORNO, C. et al. The Measurement of Deformation of a Bridge by Moiré Photography and Photogrammetry. **Strain**, 1991. 83-87.

FOWLES, G. R. **Introduction to Modern Optics.** New York: Dover Publications,Inc., 1989. ISBN ISBN 0-486-65957-7.

GASVIK, K. J. Moiré Techniques by Means of Digital Image Processing. **Applied Optics**, Washington, 22, n.23, set. 1983. 3543-48. .

GASVIK, K. J. **Optical Metrology.** Second Edition. ed. [S.l.]: John Willey & Sons, 2002.

GAZZOLA, J. et al. APPLICATION OF A PHOTOELASTIC MOIRÉ TECHNIQUE IN DETERMINING STRESS AND STRAIN DISTRIBUTIONS ON COUPLED GEARS SURFACES, 2009a. Em publicação pela Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP.

GAZZOLA, J. et al. Moiré Assisted Flexural Tests Carried On Log Bundles, Campinas,S.P. , Brasil, 2009b. Em publicação pela Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas -UNICAMP.

GAZZOLA, J. et al. Moiré supported Stress Concentration Analysis on Non Continuous Bodies., Campinas,S.P.,Brasil, 2009c. Em publicação pela Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP.

GRATICULES, C. <http://www.graticules.com/>. Disponível em: <<http://www.pyser-sgi.com/product.asp?ParentID=655>>.

GRÉDIAC, M. The use of full-field measurement methods in composite material characterization: Interest and limitations. **Applied Science and Manufacturing:Composites part A**, 35(7-8), 2004. 751-761.

GRÉDIAC, M. et al. The Virtual Fields Method for Extracting Constitutive Parameters From Full-Field Measurements: a Review. **Strain**, 2006. 233–253.

GUILD, J. The Interference Systems of Crossed Diffraction Gratings;Theory of Moiré Fringes, 1956. apud CZARNEK, R. 1993. Moiré Interferometry. [A. do livro] Robert T. Reese e Wendell A. Kawahara. Handbook on Structural Testing. Bethel,Connecticut : Society for Experimental Mechanics,Inc., 1993.

GUO, Y.; POST, D.; CZARNEK, R. The Magic of Carriers Fringes in Moiré Interferometry. **Experimental Mechanics**, 29(2), 1989. 169-173.

GURALNIK, S. A.; SUEN, E. S. Surface Condition Assessment and Profiler System for Pavements using Shadow Moiré Interferometry. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highway/NCHRP012_Final_Report.pdf>, 2000. Acesso em: 03 fev. 2010.

HALIOUA, H. et al. Projection Moiré with Moving Gratings for Automated 3-D Topography. **Applied Optics**, 22, 1983. 850-855.

HAN, B.; POST, D. Geometric Moiré. In: SHARPE, W. N. **Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics**. New York: Springer, 2008. p. 601-626.

HITACHI CHEMICAL CO. LTD. www.hitachi.com. Acesso em: 2011.

HOLISTER, G. L.; LUXMOORE, A. R. The Production of High-Density Moiré Grids. **Experimental Mechanics**, 8, 5, 1968. 210-16.

HUNG, Y. Y.; HO, H. P. Shearography: An optical measurement technique and applications. **Materials Science and Engineering**, 49(3), 2005. 61-87.

HUNTLEY, J. M.; GREDIAC, M. Editorial. **Strain**, 46, 2010. 1-2.

IMAGE J - IMAGE PROCESSING AND ANALYSIS IN JAVA. National Institute of Health. <http://imagej.nih.gov/ij/>. Disponível em: <<http://imagej.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 25 april 2011.

KAFRI, O.; GLATT, I. **The Physics of Moiré Metrology**. New York: Wiley, 1990.

KIESLING, E. W. **Nonlinear, Quasi - Static Behavior of Some Photoelastic and Mechanical Model Materials**. (PhD thesis) - Michingan State University. East Lansing. 1966. apud CLOUD, G. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

KIESLING, E. W. **Nonlinear, Quasi - Static Behavior of Some Photoelastic and Mechanical Model Materials**. (PhD thesis) - Michingan State University. East Lansing. 1966.

KUJAWINSKA, M. Automated In-Plane Moiré Techniques and Grating Interferometry. In: LAERMAN, K. **Optical Methods in Experimental Mechanics**. Wien, New York: Springer, 1998. p. 123-195.

LE MAGOROU, L.; BOS, F.; ROUGER, F. Identification of constitutive laws for wood-based panels by means of an inverse method. Composite Science and Technology. **Composite Science and Technology**, 62(4), 2002. 591-596.

LEE, J. R. et al. Digital phase-shifting grating shearography for experimental analysis of fabric composites under tension. **Composites PartA: Applied Science and Manufacturing**, 35(7-8), 2004. 849-859.

LIGTENBERG, F. K. **The Moiré Method:** A New Experimental Method for the Determination of Moments in Small Slab Models. Proc.SESA. [S.l.]: [s.n.]. 1954. p. 83-98. apud DALLY, J. W.; SHUKLA, A. Experimental Solid Mechanics. 4ª. ed. Knoxville: College House Enterprises, LLC, 2010.

LINO, A. C. L. **Técnica Óptica de Moiré Visando a Aplicação no Estudo de Superfícies Irregulares.** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola) - FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas, p. 86. 2002.

LINO, A. C. L. **Aplicação de Moiré de Projeção com Deslocamentos de Fase na Construção de Modelos Digitais Topográficos de Órgãos Vegetais.** (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola) – FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas -UNICAMP. Campinas, p. 92. 2008.

LUXMOORE, A. R.; HERMANN, R. The Rapid Deposition of Moiré Grids. **Experimental Mechanics**, 11, 5, 1971. p. 375.

MAX LEVY. www.maxlevy.com.

MULOT, M. Application of Moiré to the Study of Mica Deformation. **Rev.D'Optique**, Washington, 4, mai. 1925. 252-259. apud Sciammarella, C.A.;The Moiré Method-A Review.Experimental Mechanics,v.44,n8,p418-433,nov.1982.

NISHIJIMA, Y. Moiré patterns: Their Application to Refractive Index and Refractive Index Gradient Measurements. **Journal of the Optical Society of America**, Washington., 54, n.1, 1964. 1-5.

OSTER, G.; NISHIJIMA, Y. Moiré Patterns. **Scientific American Resource Library: Readings in the Physics Sciences and Technology Offprints 291-326**, Washington, 3, 1964. 54-63.

PARKS, J. Geometric Moiré. In: MECHANICS, S. F. E. **Handbook on Experimental Mechanics**. [S.l.]: [s.n.], 1993. Cap. 6, p. 267-296.

PATORSKY, K. **The Handbook of Moiré Technique**. Oxford: Elsevier, 1993.

PHILLIPS, J. W. **TAM 326—Experimental Stress Analysis**-. (Lectures Notes) - University of Illinois Champaign-Urbana. [S.l.]. 2001.

PIRO, J.-L.; GRÉDIAC, M. Producing and Transferring Low-Spatial Frequency Grids for Measuring Displacement Fields with Moiré and Grid Method. **Experimental Techniques**, 28, issue 4, jul/ago. 2004. 23.

POPOV, E. P. **Resistência dos Materiais**. 2ª. ed. [S.l.]: Prentice-Hall Inc, 1978.

POST, D. New Optical Methods of Moiré Fringe Multiplication; Three Simple Optical Methods are Introduced to Increase the Sensitivity and Accuracy of Moiré Analyses by an Order of Magnitude or More. **Experimental Mechanics**, 8, 2, 1968. 63-68.

POST, D. Moiré Interferometry in White Light. **Applied Optics**, 18, nº24, 1979. 4163-4167.

POST, D.; IFJU, P.; HAN, B. **High Sensitivity Moiré**. New York, USA: Springer-Verlag, 1994.

RAYLEIGH, L. On the Manufacture and Theory of Diffraction Gratings. **Scientific Papers**, **1**, **209**; **Phil. Mag.**, 47, 1874. 81-193 and 193-205. apud SCIAMMARELLA, C. A. The moiré method – A review. *Experimental Mechanics*. v.44, n.8, p. 418-433, nov., 1982.

REESE, R. T.; WENDELL, A. K. **Handbook on Structural Testing**. Bethel: Society of Experimental Mechanics, 1993.

REINHORN, A. M. CIE616 - Experimental Methods In Structural Engineering. (**Notas de Aula**) - **University at Buffalo / State University of New York**, 2010. Disponível em: <<http://civil.eng.buffalo.edu/CIE616/>>. Acesso em: 2011.

RIBEIRO, J. E. P. C. **Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas pelo Processo de Fabricação**. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto. Cidade do Porto, Portugal, p. 250. 2006.

RILEY, W. F.; DURELLI, A. J. Application of Moiré Methods to the Determination of Transient Stress and Strain Distributions. *Journal of Applied Mechanics*. v.29, n.4. **Journal of Applied Mechanics**, v.29, n.4, 1962.

SANTOS, J. C. et al. Moiré Supported Flexural Tests on Wooden Beams., 2009. Em publicação pela Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP.

SCHWARZ, R. C. Geometrical Moiré. In: KOBAYASHI, A. **Handbook on Experimental Mechanics**. New Jersey: Prentice Hall, 1987.

SCIAMMARELLA, C. A. The Moiré Method-A Review. **Experimental Mechanics**, 44, nov. 1982. 418-433.

SHARPE, W. N. **Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics**. New York: Springer, 2008. 1098 p.

SJÖDAHL, M. Some recent advances in electronic speckle photography. **Optics and Lasers in Engineering**, 29(2-3), 1998. 125-144.

SOILLE, P. Morphological Phase Unwrapping. **Optical and Lasers in Engineering**, 32, jan. 2000. 339-352.

SPOTS. Standardisation Project for Optical Techniques of Strain Measurement; Good Practice Guide to Geometric Moiré for In-Plane Displacement/Strain Analysis, 2005. Disponível em: <www.optical strain.org>.

STRAKA, P.; PINDER, J. T. Application of Moiré Grids for Deformation Studies in a Wide Temperature Range. **Experimental Mechanics**, 14, 5, 1974. 214-16.

SU, X.; CHEN, W. Fourier Transform Profilometry: A Review. **Optical and Lasers in Engineering**, 35, 2001. 263-284.

SURREL, Y. Fringe analysis. In: RASTOGI, P. K. **Photomechanics (Topics in Applied Physics)**. [S.l.]: Springer Verlag, 1999. p. 57-104.

SURREL, Y. Les techniques optiques de mesures de champ: Essai de classification.

Instrumentation, Mesure, Métrologie, 4(3-4), 2004a. 11-42.

SURREL, Y. **A simple and effecient noninterferometric method for slope measurement**. Xth SEM International Congress on Experimental Mechanics. Costa Mesa,California,USA: Society of Experimnetal Mechnics. 2004b.

SURREL, Y. La technique de la grille pour la mesure de champs de déplacements et ses applications. **Instrumentation, Mesure, Métrologie**, 4(3-4), 2004c. 193-216. apud (SURREL,2004a).

SUTTON, M. A. et al. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision. In: RASTOGI, P. K. **Photomechanics (Topics in Apllied Physics)**. [S.l.]: Springer Verlag, 1999. p. 323-372.

SYNNERGREN, P.; SJÖDAHL, M. A stereoscopic digital speckle photography system for 3D displacement field measurements. **Optics and Lasers in Engineering**, 31(6), 1999. 425-443.

TAKASAKI, H. Moiré topography. **Applied Optics**, Washington, 9, out. 1970. 1457-52.

TAKASAKI, H. Moiré Topography. **Applied Optics**, Washington, 12, abr. 1973. 845-50.

TAKEDA, N. et al. Evaluation of Microscopic Deformation in CFRP Laminates with Delamination by Micro-Grid Methods. **Journal of Composite Materials**, 31(1), 1998. 83-100.

TAKEIA, T. **Análise Experimental de Estruturas**. (Notas de aula) - Escola de Engenharia de São Carlos -USP. [S.l.]. 2001.

THEOCARIS, P. S. **Moiré Fringes in Strain Analysis**. New York: Pergamon Press, 1969. apud CLOUD, G. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

TIMOSHENKO, S. P. **The History of Strenght of Materials**. New York: McGraw-Hill, 1953. apud REESE, R. T.; WENDELL, A. K. Handbook on Structural Testing. Bethel: Society of Experimental Mechanics, 1993.

TOLLENAAR, D. **Moiré: Interferentieverschijnselen bij Rasterdruk**. Amsterdasm Instituut voor Grafische Techniek. Amsterdam. 1945. apud Cloud, G. Optical Methods in Engineering Analysis, Cambridge, Cambridge University Press 1998.

TUTTLE, M. E. Demonstrating Moire Fringes Using Gratings Produced with a Laser Printer. **Experimental Techniques**, 21(5), 1997. 19-23.

WANG, Y.; HASSELL, P. Measurement of Thermally Induced Warpage of BGA Packages/Substrates Using Phase-stepping Shadow. <<http://www.warpfinder.com/whitepapers/BGA%20Warpage%20Using%20Phase%20Stepping.pdf>>, 2000. Acesso em: 5 fev. 2010.

WANG, Z. **Development and Application of Computer-Aided**. (PhD Thesis) - University of Maryland. [S.l.], p. 189. 2003.

WANG, Z. Moiré Software Analysis. <http://faculty.cua.edu/wangz/software_moire.htm>, 2004. Acesso em: 05 fev. 2010.

WANG, Z. Y.; DAI, F. L. Geometric micron-moiré. **Optics and Lasers in Engineering**, 31(3), 1999. 191-198.

WELLER, R.; SHEPARD, B. M. **Displacement Measurements by Mechanical Interferometry**. Proceedings of SESA. [S.l.]: [s.n.]. 1948. p. 35-38. apud Cloud, G. Optical Methods in Engineering Analysis, Cambridge, Cambridge University Press 1998.

WILLMOT, C. J. et al. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal Geograph Research**, 90, 1985. 8995-9005. apud LINO, A. C. L. Técnica Óptica de Moiré Visando a Aplicação no Estudo de Superfícies Irregulares. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola) - FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas, p. 86. 2002.

WOLFE, R. W.; ROWLANDS, R.; LIN, C. H. Full Field Stress/Strain Analysis: Use of Moiré and TSA for Wood Structural Assemblies. **Techniques in Experimental Mechanics Applicable to Forest Products Research**, Portland, 1994. Proceedings of the Experimental Mechanics Plenary Session at the Forest Products Research Society Annual Meeting.

XAVIER, J. **Identification de la Variabilité des Rigidités du Bois à l'Interieur de l'Arbre par la Méthode des Champs Virtuels :Application au p. Pinaster dans le Plan LR.** (Tese de doutorado) - L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers-Laboratoire de Mécanique et Procédés de Fabrication-ENSAM, CER de Châlons-en-Champagne. Champagne, p. 180. 2007.

XIE, H. et al. Development of the Advanced Moiré Methods with High Resolution Microscopy at FML. In: GDOUTOS, E. E. **Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures-Proceedings of 13th International Conference on Experimental Mechanics.** Alexandroupolis: Springer, 2007. p. 321-322.

YATAGAI, T. **PMR 5862 - METROLOGIA ÓPTICA.** (Notas de aula) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SÃO PAULO. 2007. Tradução de Oswaldo Horikawa.

ZANDMAN, F. The Transfer-Grid Method, a Practical Moiré Stress Analysis Tool. **Experimental Mechanics**, 7, 7, 1967. 19-22.

**APÊNDICE - LISTAGENS DA ROTINA MULTIFRAN PARA A
MULTIPLICAÇÃO DIGITAL DE FRANJAS (DFM) *(desenvolvida pelo autor,
utilizando o Software IMAGE J).***

Multifran 8

```

var cp="CP");
    CP=getString("CP:","CP01");
var carga=( "carga");
    carga=getString("carga:","(3125kgf)");

var g=(7.75);
    g=getNumber("g:","g");
var teta=(0);
    teta=getNumber("teta:","teta");
var beta=(8);
    beta=getNumber("beta:","beta");

var dir="("y");
    dir=getString("dir:","y");

open("Iop.bmp");
run("Make Binary");
save("Iopb.bmp");
open("Iop scaled.bmp");
run("Make Binary");
run("TJ Rotate", "z-angle="+teta+" y-angle=0.0 x-angle=0.0 interpolation=linear background=0.0 adjust");
save("Iop scaled rotated.bmp");
if (dir=="x"){
for(i=1;i<=beta;i++) {
selectWindow("Iopb.bmp");
run("TJ Shift", "x-shift="+i*g/beta+" y-shift=0.0 z-shift=0.0 interpolation=linear background=0.0");
save("Iop.bmp shifted "+i+"");
imageCalculator("Add create", "Iop scaled rotated.bmp", "Iop.bmp shifted "+i+".bmp");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.4 normalize equalize");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("# "+i+" .bmp");
selectWindow("Iop.bmp shifted "+i+".bmp");
close();
}
selectWindow("Iopb.bmp");
close();
selectWindow("Iop scaled.bmp");
close();
selectWindow("Iop scaled rotated.bmp");
close();
}
else
{
for(i=1;i<=beta;i++) {
open("Iopb.bmp");
run("TJ Shift", "x-shift=0.0 y-shift="+i*g/beta+" z-shift=0.0 interpolation=linear background=0.0");
save("Iop.bmp shifted "+i+" .bmp");
selectWindow("Iopb.bmp");
close();
imageCalculator("Add create", "Iop scaled rotated.bmp", "Iop.bmp shifted "+i+".bmp");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.4 normalize equalize");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("# "+i+" .bmp");
selectWindow("Iop.bmp shifted "+i+".bmp");
close();
}
}
}

```

[illegible]

```
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
save("3Result of #1.bmp");

if (dir=="x"){
  saveAs("BMP",
    ""+CP+""+carga+"#8x"+teta+"°.bmp");
}
else{
  saveAs("BMP",
    ""+CP+""+carga+"#8y"+teta+"°.bmp");
}

selectWindow("2Result of #1.bmp");
close();
selectWindow("2Result of #2.bmp");
close();
```

Multifran 16

[illegible][illegible][illegible]

Multifran 32

```
run("Memory & Threads...", "maximum=1000  
parallel=2");  
var cp=("CP");  
    CP=getString("CP:", "CP01");  
var carga=("carga");  
    carga=getString("carga:", "(3125kgf)");
```

```
var g=(7.75);
            g=getNumber("g:",g);
var teta=(0);
            teta=getNumber("teta:",teta);
var beta=(32);
            beta=getNumber("beta:",beta);
```

```
var dir=("y");
    dir=getString("dir:","y");
```

[illegible][illegible][illegible]

```
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
save("3Result of #'+'.bmp");

for(i=1;i<=beta/4;i++) {
selectWindow("2Result of #'+'.bmp");
close();
}
```

[illegible][illegible]

```
if (dir=="x"){
  saveAs("BMP",
    ""+CP+""+carga+"#32x"+teta+"°.bmp");
} else{
  saveAs("BMP",
    ""+CP+""+carga+"#32y"+teta+"°.bmp");
}
```

```
selectWindow("4Result of #1.bmp");
close();
selectWindow("4Result of #2.bmp");
close();
```

Multifran 64

[illegible][illegible][illegible]

```
saveAs("BMP",
""+CP+""+carga+"#64x"+teta+"°.bmp");
}
else{
saveAs("BMP",
""+CP+""+carga+"#64y"+teta+"°.bmp");
}

selectWindow("5Result of #1.bmp");
close();
selectWindow("5Result of #2.bmp");
close();
```

Multifran 128

```
run("Memory & Threads...", "maximum=1700  
parallel=1");  
var cp="CP");  
    CP=getString("CP:","CP01");  
var carga="(carga)";  
    carga=getString("carga:","(3125kgf)");  
  
var g=(7.75);  
        g=getNumber("g:","g");  
var teta=(0);  
        teta=getNumber("teta:","teta");  
var beta=(128);  
        beta=getNumber("beta:","beta");  
  
var dir="(y)";  
    dir=getString("dir:","y");
```

[illegible]

```
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
save("#+i+.bmp");
selectWindow("Iop.bmp shifted"+i+".bmp");
close();
}
```

[illegible][illegible][illegible]

```

run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
save("6Result of #"+"i+" ".bmp");
}

imageCalculator("Difference create", "6Result of
#1.bmp", "6Result of #2.bmp");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.4 normalize
equalize");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
run("Accurate Gaussian Blur", "sigma=2");
save("7Result of #1.bmp");

if (dir=="x"){
selectWindow("7Result of #1.bmp");
saveAs("BMP",
""+CP+""+carga+"#128x"+teta+"°.bmp");
}
else{
selectWindow("7Result of #1.bmp");
saveAs("BMP",
""+CP+""+carga+"#128y"+teta+"°.bmp");
}

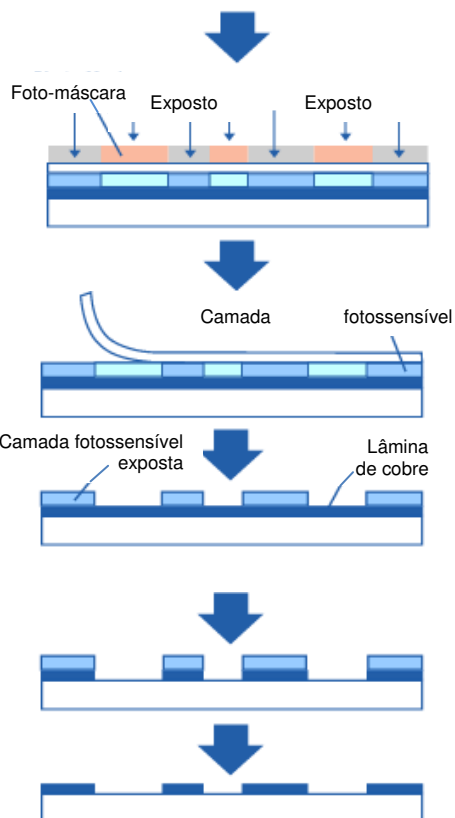
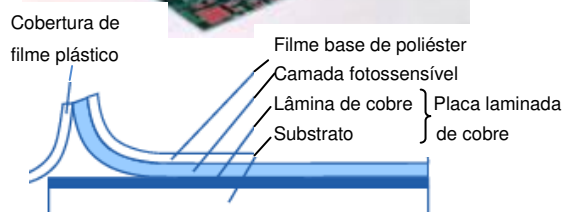
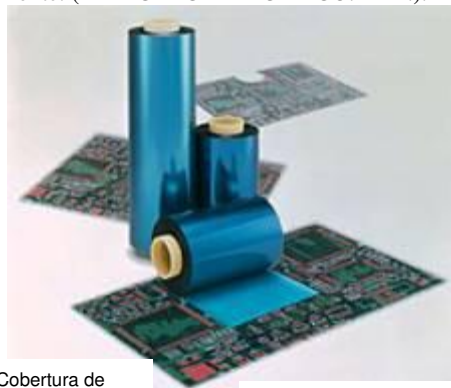
selectWindow("6Result of #1.bmp");
close();
selectWindow("6Result of #2.bmp");
close.

```


ANEXO A - FILME FOTOSSENSÍVEL SECO PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSOS

ANEXO A - FILME FOTOSSENSÍVEL SECO PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSOS

Fonte: (HITACHI CHEMICAL CO. LTD.).



[Resumo]

Este é um filme do tipo material fotorresiste que é aplicado em laminados revestidos de cobre usados para formar os circuitos das placas de circuito impresso.

[Estrutura] Composta por três camadas:

- (a) filme base de poliéster,
- (b) camada fotossensível
- (c) cobertura de filme plástico.

1) Retire o filme plástico de cobertura e aplique o material sobre a face folheada de cobre (azul marinho), sob calor e pressão.

2) Coloque o fotolito com o desenho do layout (máscara) e o exponha aos raios ultravioleta. Sensibilize a camada da película fotossensível na área exposta (azul médio).

3) Retire o fotolito com o desenho do layout e o filme de proteção da base.

4) Revelar a camada fotossensível exposta em uma solução alcalina diluída, para remover a área não exposta do fotossensível (azul claro). O restante da camada fotossensível curada permanece como resistente.

5) Use uma solução de cloreto de cobre para dissolver e remover qualquer cobre que não está coberto pelo resistente.***

6) Retire o fotorresiste com uma solução alcalina forte. O cobre resultante forma o circuito.***

***Os passos (5) e (6) não são usados no caso de gravação de retículos.